

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ
ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

ΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.E.M.:1385

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Ρ.Ε.Π. ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΟΖΑΝΗ 2020

Ευχαριστίες

Με την παράδοση της παρούσης εργασίας ολοκληρώνονται και οι σπουδές μου στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του πανεπιστημίου δυτικής Μακεδονίας. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπου που με βοήθησαν να ολοκληρώσω αυτήν την εργασία .

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και μου παρείχε τα εφόδια να σπουδάσω.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την καθηγήτρια μου, Κα Ραφαέλλα Σωτηροπούλου η οποία επέβλεψε την εξέλιξη της εργασίας μου και με καθοδήγησε δίνοντας μου χρήσιμες συμβουλές. Οι επισημάνσεις της ήταν καθοριστικές για την πορεία και την ολοκλήρωση της εργασίας .

Θα ήθελα επίσης να δώσω και τις ευχαριστίες μου στον κύριο Ιωάννη Στεργίου που με την απεριόριστη διάθεση του να βοηθήσει, συνέβαλε στη διαμόρφωση του περιεχομένου της εργασίας και στη μετάδοση σημαντικών γνώσεων που αφορούν το αντικείμενο της εργασίας μου.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω και σε όλους τους καθηγητές που είχα όλα τα χρόνια της μέχρι στιγμής ακαδημαϊκής μου ζωής, για την συνεργασία τους και για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν. Επίσης ευχαριστώ τον κύριο Κυριάκο Βαφειάδη για τη βοήθεια του σε απορίες που αφορούσαν μεγάλο κομμάτι της εργασίας μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και μηχανικό Η/Υ Νίκο Ροζή για την υποστήριξη του στη χρήση προγραμματισμού και εργαλείων για την ανάλυση δεδομένων .

Κοζάνη, Μάρτιος 2020

Γεώργιος Γιωτόπουλος

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα», εστιάζεται στη μελέτη των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής λόγω μεταβολής μετεωρολογικών παραμέτρων στην απόδοση των αιολικών πάρκων. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν να μελετηθούν αιολικά πάρκα που είναι εγκατεστημένα στον Ελλαδικό χώρο καθώς η Ελλάδα είναι μια χώρα που διαθέτει πλούσιο αιολικό δυναμικό και το επενδυτικό ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια ολοένα και αυξάνεται.

Πρωτεύοντα ρόλο στη εκτίμηση της απόδοσης των αιολικών πάρκων και του αιολικού δυναμικού που πρόκειται να διαμορφωθεί στο μέλλον-παραμέτροι χρήσιμες για τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων της αιολικής βιομηχανίας στο μέλλον, -διαδραμάτισε η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος που τα τελευταία χρόνια υφίσταται πιέσεις λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια ερευνητική δραστηριότητα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, η οποία εστιάζεται στην περιοχή της Ευρώπης και της Μεσογείου. Η περιοχή αυτή αποτελεί μια μεγάλη χωροταξική ενότητα με ποικιλόμορφο φυσικό περιβάλλον με πολλές περιοχές της να βασίζουν την οικονομική τους ανάπτυξη στην καλλιέργεια της Γης. Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας εστίασαμε τη μελέτη στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού αιολικών πάρκων που έχουν εγκατασταθεί στην Ελλάδα και στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην ηλεκτρική απόδοση τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της απόδοσης των αιολικών πάρκων στο μέλλον, λαμβάνοντας υπόψη τις ενδεχόμενες πιέσεις που μπορεί να ασκηθούν σε αυτά από την κλιματική αλλαγή. Υπό το πρίσμα αυτό, είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν οι μετεωρολογικές παράμετροι ενδιαφέροντος (π.χ., ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου) για τις υπό μελέτη περιοχές στο παρόν και η ενδεχόμενη μεταβολή τους στο μέλλον. Για να γίνει εκτίμηση των παραγόντων που διαμορφώνουν το κλίμα τόσο στο παρόν, όσο και στο μέλλον χρησιμοποιήσαμε το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο (Global Climate Model –GCM) NASA GISS ModelE. Η κλιματική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε καλύπτει την περίοδο 1880 έως 2055. Ως περίοδος αναφοράς για το παρόν χρησιμοποιήθηκε το διάστημα 2008 – 2012 (τρέχουσες συνθήκες), ενώ ως περίοδος αναφοράς για το μέλλον τα έτη 2048 – 2052 (μελλοντικές συνθήκες). Ωστόσο, επειδή τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το GCM δεν έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα, θεωρήθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί το αριθμητικό μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF το οποίο αποτελεί ένα προηγμένο εργαλείο προσομοίωσης των μετεωρολογικών διεργασιών, προκειμένου να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα των αποτελεσμάτων. Με τη βοήθεια του μοντέλου WRF έγινε προσομοίωση των κλιματικών μεταβλητών ακολουθώντας την τεχνική της δυναμικής μείωσης της κλίμακας για τις υπό μελέτη περιοχές τόσο για το παρόν όσο και το μέλλον και στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους για να υπολογιστούν οι μετεωρολογικές παράμετροι.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του GCM και του μετεωρολογικού μοντέλου WRF, αντικατοπτρίζουν την κλιματολογία της περιοχής και όχι την μετεωρολογία της, δηλαδή το τι αναμένεται να συμβεί βάσει των κλιματολογικών χαρακτηριστικών της υπό μελέτη περιοχής, και όχι το τι συμβαίνει πραγματικά την περίοδο της προσομοίωσης. Έτσι, για να γίνει ρεαλιστική αποτύπωση των μελλοντικών συνθηκών, χρησιμοποιήσαμε το μετεωρολογικό μοντέλο Cera-sat, το οποίο παρείχε παρατηρούμενες τιμές των υπό μελέτη περιοχών για τα έτη 2008-2012. Στις τιμές του μοντέλου Cera-sat εφαρμόζουμε τις μεταβολές που προέκυψαν από το υπολογιστικό σύστημα GISS ModelE – WRF και τις χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό ρεαλιστικών μελλοντικών μετεωρολογικών παραμέτρων.

Στη συνέχεια, εφόσον ήδη έχουμε υπολογίσει τις τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων που αφορούν την υπό εξέταση περιοχή και έχουμε υπολογίσει και αποτυπώσει τη μεταβολή τους σε χάρτες, η έρευνα εστιάζεται σε τρία αιολικά πάρκα που έχουν εγκατασταθεί στην Ελλάδα. Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας συλλέγουμε τις μεταβολές των ανεμολογικών παραμέτρων έτσι ώστε να γίνει στατιστική επεξεργασία της ταχύτητας του ανέμου που εμφανίζεται στα αιολικά πάρκα. Τέλος έχοντας λάβει υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που έχουν εγκατασταθεί στα αιολικά πάρκα, υπολογίσαμε σε ετήσια βάση τόσο για το παρόν όσο και το μέλλον την ηλεκτρική παραγωγή των αιολικών πάρκων.

Abstract

The present thesis presents a research activity of the Department of Mechanical Engineering of the University of Western Macedonia, which focuses on the European and Mediterranean region. This area is a large spatial unit with diverse natural environment with many areas basing their economic growth on the cultivation of the Earth. In the second part of the work, we focused on the study of estimating the wind potential of wind farms installed in Greece and the impact of climate change on their electrical efficiency.

The purpose of this paper is to evaluate the future performance of wind farms, taking into account the potential pressures that climate change may have on them. In this light, it is necessary to estimate the meteorological parameters of interest (eg wind speed and direction) for the areas under study here and their possible future change. We used the NASA GISS ModelE Global Climate Model (GCM) to assess climate change factors both in the present and in the future. The climate simulation covers the period 1880 to 2055. The reference period for the present period was the period 2008 - 2012 (current conditions), while the reference period for the future is 2048 - 2052 (future conditions). However, because the results obtained from the GCM do not have much resolution, it was considered necessary to use the WRF numerical meteorological model, which is an advanced tool for simulating meteorological processes, in order to increase the resolution of the results. The WRF model simulated the climate variables using the dynamic scaling technique for the regions under study for both the present and the future, and then the results were compared to calculate the meteorological parameters.

The results obtained from the simulations of the GCM and the WRF meteorological model reflect the climatology of the area rather than its meteorology, that is, what is expected to happen based on the climatic characteristics of the study area, rather than what is actually happening during the period. simulation. Thus, in order to make the future conditions realistic, we used the Cera-sat meteorological model, which provided observed values of the study areas for the years 2008-2012. In the Cera-sat model values, we apply the changes resulting from the GISS ModelE - WRF system and use them to calculate realistic future meteorological parameters.

Then, since we have already calculated the values of the meteorological parameters for the area in question and calculated and mapped their change to maps, the research focuses on three wind farms located in Greece. In the second part of the work, we collect the variations of the wind parameters so that the wind speed statistics can be processed in wind farms. Finally, taking into account the technical characteristics of the wind turbines installed in the wind farms, we calculated on an annual basis both current and future wind farms.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	3
Περίληψη	4
Κεφάλαιο 1. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα	11
1.1 Κλιματική αλλαγή.....	11
1.1.1 Κλίμα και κλιματική αλλαγή	11
1.1.2 Τα αίτια της κλιματικής αλλαγής.....	12
1.1.3 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.....	14
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	14
1.2.1 Ορισμός.....	14
1.2.2 Κυριότερες μορφές Α.Π.Ε	15
1.3 Αιολική ενέργεια.....	18
1.3.1 Εισαγωγή	18
1.3.2 Ισχύς του ανέμου.....	19
1.3.3 Ανάλυση των ανεμογεννητριών	21
1.4 Αιολικό δυναμικό.....	24
1.4.1 Γενική κυκλοφορία ανέμου	24
1.4.2 Γεωστροφικοί-Επιφανειακοί άνεμοι.....	25
1.4.3 Μεταβολή Ταχύτητας του Ανέμου με το Ύψος.....	25
1.4.4 Κατανομή ταχύτητας ανέμου	27
1.5 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	29
1.5.1 Εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα	29
1.5.2 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στην αιολική ενέργεια	31
Κεφάλαιο 2. Τα κλιματικά μοντέλα NASSA GISS και WRF.....	34
2.1 Κλιματικά μοντέλα.....	34
2.1.1 Εφαρμογές των κλιματικών μοντέλων	34
2.1.2 Κλιματικά σενάρια.	35
2.1.3 Μαθηματική διαμόρφωση των κλιματικών μοντέλων	36
2.1.4 Χωρική-Χρονική ανάλυση κλιματικού μοντέλου	37
2.1.5 Τύποι κλιματικών μοντέλων	40
2.2 Το κλιματικό μοντέλο Nassa Giss.....	41
2.2.1 Φιλοσοφία του μοντέλου	41
2.2.2 Διαμόρφωση του μοντέλου.....	42
2.2.3 Μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF.....	43
2.2.4 Υποκλιμάκωση.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Μεθοδολογία προσομοίωσης και υπολογισμού ηλεκτρικής απόδοσης.....	47
3.1 Επιλογή των κατάλληλων περιοχών και η διαδικασία προσομοίωσης	47
3.2 Μεθοδολογία υπολογισμού αιολικού δυναμικού και παραγόμενης ισχύος για τα αιολικά πάρκα.	50

3.2.1 Μεθοδολογία υπολογισμού ωφέλιμης ισχύς.....	50
3.2.2 Μέθοδος υπολογισμού κατανομής συχνοτήτων	51
3.2.3 Μεθοδολογία υπολογισμού ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε κάθε αιολικό πάρκο ...	53
Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	56
4.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων WRF	56
4.1.1 Πίεση εδάφους	56
4.1.2 Θερμοκρασία στα 2 μέτρα	58
4.1.3 Ταχύτητα και φορά του ανέμου	59
4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τα υπό μελέτη αιολικά πάρκα.....	62
4.2.1 Μεταβολή θερμοκρασίας -επιφανειακής πίεσης.....	62
4.2.2 Ταχύτητα ανέμου	65
4.2.3 Μέση μηνιαία ισχύς ανεμογεννητριών	67
4.2.4 Στατιστική ανάλυση ταχύτητας ανέμου	69
4.2.5 Ηλεκτρική παραγωγή αιολικών πάρκων.....	74
4.3 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων	76
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα -Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	77
Βιβλιογραφία.....	80

Κατάλογος σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1:ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ 1880.ΠΗΓΗ:ΝΑΣΣΑ GISS.....	13
ΣΧΗΜΑ 2:ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ.....	15
ΣΧΗΜΑ 3:ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΑΡΚΟ.....	16
ΣΧΗΜΑ 4:ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟΣ.....	16
ΣΧΗΜΑ 5:ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	17
ΣΧΗΜΑ 6:ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	18
ΣΧΗΜΑ 7:ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	18
ΣΧΗΜΑ 8:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ -ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ (ΜΠΑΗΣ 2014).....	20
ΣΧΗΜΑ 9:ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ, 2005).....	21
ΣΧΗΜΑ 10:ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ (ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ, 2005).....	22
ΣΧΗΜΑ 11:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΧΥΟΣ (ΑΝΕΜΟΥ-ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ)-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ. ΠΗΓΗ: ΜΑΡΝΕΛΛΟΣ, (2015).....	23
ΣΧΗΜΑ 12:ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ(ΙΟΥΛΙΟΣ 1984).....	24
ΣΧΗΜΑ 13:ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ. ΠΗΓΗ:ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ, (2015).....	26
ΣΧΗΜΑ 14:ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΚΘΕΤΙΚΟ ΚΑΙ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΟ ΝΟΜΟ. ΠΗΓΗ: ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ, (2015).....	27
ΣΧΗΜΑ 15:ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Κ (ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ 2005).....	28
ΣΧΗΜΑ 16:ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ C (ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ, 2005).....	29
ΣΧΗΜΑ 17:ΧΑΡΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	30
ΣΧΗΜΑ 18:ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	31
ΣΧΗΜΑ 19:ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΑ 10 ΜΕΤΡΑ, ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΧΡΟΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ 1961-1990 ΚΑΙ 2071-2100, ΥΠΟ ΤΟ SRES Α2 ΣΕΝΑΡΙΟ. ΠΗΓΗ: CHRISTENSEN ET AL.	32
ΣΧΗΜΑ 20:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΛΛΑΓΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΗΓΗ: IPCC, 2014.....	35
ΣΧΗΜΑ 21:ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΟΥ CO ₂ , (ΒΑΣΚΟΥ, 2015).....	36
ΣΧΗΜΑ 22:ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ NAVIER-STOKES ΓΙΑ ΤΗΝ "ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗ" ΡΟΗ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (X, Y ΚΑΙ Z).....	37
ΣΧΗΜΑ 25:ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΙΓΜΑ ΣΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΙΕΣΗ.....	42
ΣΧΗΜΑ 26:ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 40 ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.	43
ΣΧΗΜΑ 27:Η ΡΟΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥ WPS.	45
ΣΧΗΜΑ 28:ΥΠΟΚΛΙΜΑΚΩΣΗ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.(APPARICIO 2012)	45
ΣΧΗΜΑ 29:ΤΥΠΟΙ ΥΠΟΚΛΙΜΑΚΩΣΗΣ (ΔΙΑΛΕΖΗΣ, 2015).....	46
ΣΧΗΜΑ 30:Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΝΕΙ ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ WRF.....	47
ΣΧΗΜΑ 31:ΧΡΗΣΗ ΓΛΩΣΣΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ, ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ ΧΩΡΙΚΟ ΚΕΛΙ.....	48
ΣΧΗΜΑ 32:ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	49
ΣΧΗΜΑ 33:ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ K=1,98 ΚΑΙ C=8,8. ΠΗΓΗ: ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ, 2018.....	52
ΣΧΗΜΑ 34:ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ VESTAS V44/600.ΠΗΓΗ: THEWINDPOWER.NET.....	54
ΣΧΗΜΑ 35:ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ VESTAS V52/850. ΠΗΓΗ: THEWINDPOWER.NET.....	54
ΣΧΗΜΑ 36:ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ GAMESSA G52/850. ΠΗΓΗ: THEWINDPOWER.NET.....	55
ΣΧΗΜΑ 37:ΠΙΕΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ CERA-SAT ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2008-2012.....	57
ΣΧΗΜΑ 38: ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΣΩΝ ΟΡΩΝ ΠΙΕΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ 2008-2012 ΚΑΙ 2048-2052.....	57

ΣΧΗΜΑ 39: ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΑ 2 ΜΕΤΡΑ, ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2008-2012.....	58
ΣΧΗΜΑ 40: ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΣΩΝ ΟΡΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ 2 ΜΕΤΡΑ.....	59
ΣΧΗΜΑ 41: ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΒΑΣΗΣ.....	60
ΣΧΗΜΑ 42: ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΣΩΝ ΟΡΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ	61
ΣΧΗΜΑ 43: ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΣΩΝ ΟΡΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ	62
ΣΧΗΜΑ 44: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΚΡΗΤΗΣ)	63
ΣΧΗΜΑ 45: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΚΡΗΤΗΣ)	63
ΣΧΗΜΑ 46 : ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ”, ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ)	64
ΣΧΗΜΑ 47: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ”, ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ).....	64
ΣΧΗΜΑ 48: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΣΙΛΙΚΟΚΑΣ, ΕΥΒΟΙΑΣ).....	65
ΣΧΗΜΑ 49 : ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΙΕΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΣΙΛΙΚΟΚΑΣ, ΕΥΒΟΙΑΣ).....	65
ΣΧΗΜΑ 50: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052), (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗΣ, ΚΡΗΤΗ)	66
ΣΧΗΜΑ 51: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ”, ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ).....	67
ΣΧΗΜΑ 52: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΤΣΙΛΙΚΟΚΑ” ΣΤΗΝ ΕΥΒΟΙΑ)	67
ΣΧΗΜΑ 53: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗ” ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ, ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052).....	68
ΣΧΗΜΑ 54: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ” ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ, ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052).....	69
ΣΧΗΜΑ 55: ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΙΣΧΥΣ ΤΩΝ ΔΡΟΜΕΩΝ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΤΣΙΛΙΚΟΚΑ” ΣΤΗΝ ΕΥΒΟΙΑ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052).....	69
ΣΧΗΜΑ 56: ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗ” ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ)	70
ΣΧΗΜΑ 57: ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ”, ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ).....	71
ΣΧΗΜΑ 58: ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΤΣΙΛΙΚΟΚΑ”, ΕΥΒΟΙΑ)	71
ΣΧΗΜΑ 59: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Κ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗ” ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ)	72
ΣΧΗΜΑ 60: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Κ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ “ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ” ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ).....	72
ΣΧΗΜΑ 61: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Κ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΣΙΛΙΚΟΚΑΣ, ΕΥΒΟΙΑ)	73

ΣΧΗΜΑ 62: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Κ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052)(ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗΣ, ΚΡΗΤΗ)	73
ΣΧΗΜΑ 63: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΚΛΙΜΑΚΑΣ C ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΒΑΣΗΣ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΑΓ.ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ)	74
ΣΧΗΜΑ 64: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΚΛΙΜΑΚΑΣ C ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052) (ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΣΙΛΙΚΟΚΑ, ΕΥΒΟΙΑ)	74
ΣΧΗΜΑ 65: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052)(ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΗΣ ΠΕΡΔΙΚΟΚΟΡΥΦΗΣ, ΚΡΗΤΗ)	75
ΣΧΗΜΑ 66:ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052)(ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΑΓ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ)	75
ΣΧΗΜΑ 67: ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2008-2012) ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2048-2052)(ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΤΣΙΛΙΚΟΚΑ, ΕΥΒΟΙΑ)	76

Κατάλογος πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1:ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΑΝΕΜΩΝ	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΛΙΣΤΑ (GCMS), (ΠΗΓΗ: ΔΙΑΛΕΖΟΣ, 2015)	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 3:ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ, ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ Κ, ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ C ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΑ ΤΡΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	77

Κεφάλαιο 1. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Στο 1ο κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, τα αίτια που το προκαλούν και οι επιπτώσεις που επιφέρει στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Επίσης, γίνεται αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που θεωρούνται μια σπουδαία αφετηρία για την αντιμετώπιση των οικολογικών προβλημάτων του πλανήτη Γη. Στη συνέχεια δίνονται πληροφορίες που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια και τα αιολικά πάρκα που διαθέτουν ως εργαλεία αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας τις ανεμογεννήτριες. Παράλληλα περιγράφεται το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας και τα επίπεδα αξιοποίησης του από τα αιολικά πάρκα που έχουν εγκατασταθεί σε πολλές περιοχές της χώρας. Τέλος παρουσιάζονται οι συνέπειες που εκτιμάται ότι θα προκαλέσει τις επόμενες δεκαετίες η κλιματική αλλαγή στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, σύμφωνα με παρεμφερείς μελέτες.

1.1 Κλιματική αλλαγή

1.1.1 Κλίμα και κλιματική αλλαγή

Το κλίμα μιας περιοχής περιγράφεται ως η μέση καιρική κατάσταση που προκύπτει από τις μακροχρόνιες παρατηρήσεις διάφορων μετεωρολογικών στοιχείων, όπως η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα του ανέμου κ.α. Το κλίμα διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή και υπάρχουν πολλοί παράγοντες, τόσο φυσικοί όσο και ανθρωπογενείς, οι οποίοι το καθορίζουν. Οι παράγοντες που συντελούν στη μεταβολή του κλίματος από τόπο σε τόπο είναι (Ahrens, 2011):

- Η ηλιακή ακτινοβολία και το γεωγραφικό πλάτος του τόπου
- Η γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας
- Η κατανομή του εδάφους και των θαλασσών
- Το γήινο ανάγλυφο
- Η φύση και η κατάσταση του εδάφους
- Τα θαλάσσια ρεύματα

Πιο συγκεκριμένα η αλλαγή του κλίματος αποτελεί τη διακύμανση του παγκόσμιου ή του κλίματος μιας συγκεκριμένης περιοχής με την πάροδο του χρόνου. Αντανακλά τις αλλαγές στη μεταβλητότητα ή τη μέση κατάσταση της ατμόσφαιρας σε χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από δεκαετίες έως εκατομμύρια χρόνια. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να προκληθούν από εσωτερικές διεργασίες της Γης, εξωτερικές δυνάμεις (π.χ. διακυμάνσεις στην ένταση του ηλιακού φωτός) ή πιο πρόσφατα, ανθρώπινες δραστηριότητες

Ωστόσο ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το παγκόσμιο κλίμα είναι η εισερχόμενη (προσπίπτουσα) ηλιακή ακτινοβολία (Watt ανά τετραγωνικό μέτρο) στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία αντιπροσωπεύει ένα ποσό ενέργειας από τον Ήλιο που τελικά καθορίζει την επιφανειακή θερμοκρασία της Γης. Σύμφωνα με τη φυσική έννοια του φαινομένου του θερμοκηπίου η ισορροπία μεταξύ της καθαρής εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της εξερχόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον πλανήτη είναι ο κρίσιμος παράγοντας που εξασφαλίζει τη διατήρηση της θερμοκρασίας του πλανήτη σε σταθερά επίπεδα.

Τις τελευταίες δεκαετίες καταγράφεται από τους επιστήμονες μια ανισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας η οποία έχει προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στο παγκόσμιο κλίμα. Βασική αιτία αυτής της ανισορροπίας υποστηρίζεται ότι είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα στον περιβάλλον που προκαλεί αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας τα τελευταία χρόνια και την κλιμάκωση του φαινομένου της **κλιματικής αλλαγής**.

Υπάρχει συνεχής ενασχόληση της επιστημονικής κοινότητας προκειμένου να γίνει πλήρως κατανοητό το πολυπαραμετρικό σύστημα που οδηγεί στη μεταβολή του, με τη χρήση κλιματικών μοντέλων που μεταξύ άλλων συνδυάζουν και παρατηρήσεις μετεωρολογικών σταθμών με τα αίτια που προκαλούν την κλιματική αλλαγή, εκτιμώντας με αυτόν τον τρόπο τις πιθανές μεταβολές στις κλιματικές συνθήκες παγκοσμίως. Σημαντικός παράγοντας που ευθύνεται για την κλιματική αλλαγή παγκοσμίως τις τελευταίες δεκαετίες, φαίνεται να είναι η ανθρώπινη παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον.

1.1.2 Τα αίτια της κλιματικής αλλαγής

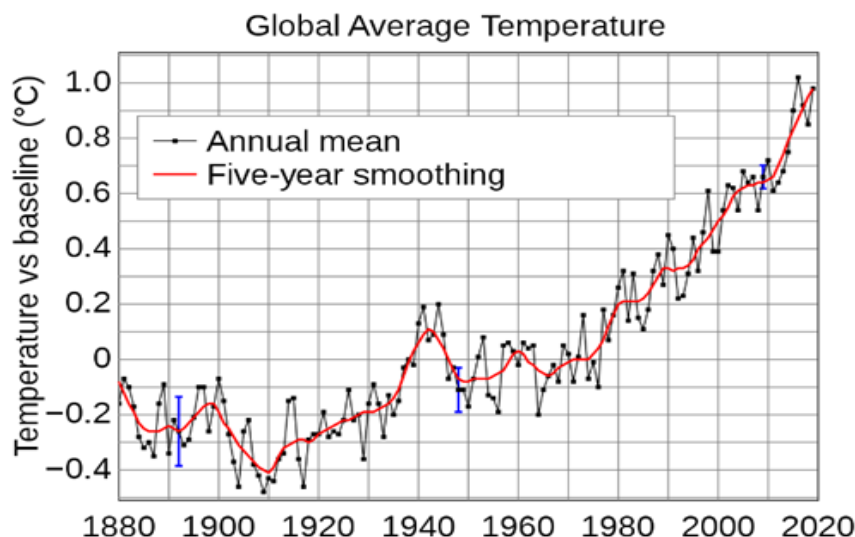
Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η ισορροπία μεταξύ καθαρής εισερχόμενης και εξερχόμενης θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ο παράγοντας που διαμορφώνει το παγκόσμιο κλίμα. Σημαντικοί λόγοι που επηρεάζουν το συγκεκριμένο ισοζύγιο είναι οι μετακινήσεις των ηπείρων στην επιφάνεια της γης, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας και οι ανωμαλίες στην γήινη κίνηση. Οι ενδογενείς αυτοί παράγοντες φαίνεται να διαμορφώνουν το κλίμα του πλανήτη εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια και διαμορφώνουν τη **φυσική μεταβλητότητα** του κλίματος. Ωστόσο από τα μέσα του 18^{ου} αιώνα όπου ο βιομηχανικός τομέας γνώρισε σημαντική ανάπτυξη, ο ανθρώπινος παράγοντας είναι αυτός που φαίνεται να ευθύνεται σε σημαντικό βαθμό για τη συνεχόμενη αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Οι άνθρωποι παρεμβαίνουν όλο και περισσότερο στο φυσικό περιβάλλον επηρεάζοντας το όλο και περισσότερο με συνέπεια το παγκόσμιο κλίμα να υφίσταται σημαντικές αλλαγές. Αυτό έχει ως συνέπεια να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα τεράστιες ποσότητες ρύπων ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι συγκεκριμένοι ρύποι που αποκαλούνται ως **αέρια θερμοκηπίου**, παγιδεύουν την ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης, εμποδίζοντας την απελευθέρωση της στο διάστημα, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας.

Πολλά από αυτά τα αέρια υπάρχουν φυσικά στην ατμόσφαιρα της Γης, ωστόσο η συγκέντρωση τους τις τελευταίες δεκαετίες έχει αυξηθεί σημαντικά, εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας κυρίως. Τα πιο σημαντικά από αυτά τα αέρια είναι τα εξής:

- διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)
- μεθάνιο
- νιτρώδες οξείδιο
- φθοριούχα αέρια

Το CO₂ είναι το αέριο του θερμοκηπίου που παράγεται συνήθως από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και είναι υπεύθυνο για το 64% της ανθρωπογενούς υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η συγκέντρωσή της στην ατμόσφαιρα είναι σήμερα 40% υψηλότερη από ό, τι κατά την περίοδο της εκβιομηχάνισης.

Άλλα αέρια θερμοκηπίου εκπέμπονται σε μικρότερες ποσότητες, αλλά παγιδεύουν θερμότητα πολύ πιο αποτελεσματικά από το CO₂ και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι χιλιάδες φορές ισχυρότερες. Το **μεθάνιο** είναι υπεύθυνο για το 17% της ανθρωπογενούς υπερθέρμανσης του πλανήτη, το **υποξείδιο του αζώτου** για το 6%.



Σχήμα 1: Μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας από το 1880. Πηγή: NASSA GISS

Τα αίτια που προκαλούν την έκρυθμη εκπομπή των συγκεκριμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι:

- Η αλόγιστη χρήση φυσικών πόρων και η καύση ορυκτών πόρων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, έχουν ως συνέπεια την απελευθέρωση επικίνδυνων για το περιβάλλον ρύπων όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το οξείδιο του αζώτου.
- Η κοπή των δασών (αποδάσωση). Τα δέντρα συντελούν στη διατήρηση του κλίματος σε σταθερά επίπεδα, απορροφώντας το CO₂ από την ατμόσφαιρα. Συνεπώς όταν κόβονται εκτάσεις δασών, η συνεισφορά τους χάνεται και ο άνθρακας που αποθηκεύεται στα δέντρα διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα, ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Η αύξηση της κτηνοτροφίας. Οι αγελάδες και τα πρόβατα παράγουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου όταν χωνεύουν τα τρόφιμά τους.
- Τα φθοριούχα αέρια συντελούν ως και 23.000 φορές περισσότερο από το CO₂ στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Θεωρούνται πολύ επικίνδυνα και βλαβερά για το περιβάλλον για αυτό και κυκλοφορούν σε μικρότερες ποσότητες και καταργούνται σταδιακά από κανονισμούς της ΕΕ.

Οι παράγοντες που περιγράφονται παραπάνω οδηγούν με γοργούς ρυθμούς στην **υπερθέρμανση του πλανήτη**. Οι επιστήμονες έχουν παρατηρήσει ότι η τρέχουσα παγκόσμια μέση θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά 0,85 °C από τα τέλη του 19ου αιώνα. Οι τελευταίες τρεις δεκαετίες ήταν πιο θερμές από οποιαδήποτε προηγούμενη δεκαετία από το 1850 που ξεκίνησαν να καταγράφονται μετεωρολογικά αρχεία. Οι κορυφαίοι κλιματικοί επιστήμονες πιστεύουν ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι σχεδόν σίγουρα η κύρια αιτία της παγκόσμιας θέρμανσης που παρατηρείται από τα μέσα του 20ού αιώνα. Μια υπέρβαση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 2°C σε σύγκριση με τη θερμοκρασία στη προ-βιομηχανική μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές αλλαγές στο παγκόσμιο περιβάλλον, όπως προειδοποιούν οι επιστήμονες. Για το λόγο αυτό, η διεθνής κοινότητα έχει αναγνωρίσει την ανάγκη να διατηρηθεί η θερμοκρασία κάτω από τους 2°C.

1.1.3 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής

Η αλλαγή του κλίματος επηρεάζει όλες τις περιοχές του κόσμου. Η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τη στάθμη της θάλασσας που συνεχώς ανεβαίνει έχει ως συνέπεια το **λιώσιμο των πάγων** στους πόλους της Γης. Επίσης σε ορισμένες περιοχές τα **ακραία καιρικά φαινόμενα** και οι βροχοπτώσεις γίνονται όλο και πιο συνηθισμένα, ενώ άλλες αντιμετωπίζουν πιο ακραία θερμικά κύματα και ξηρασίες. Αυτές οι επιπτώσεις αναμένεται να ενταθούν κατά τις προσεχείς δεκαετίες και η συστηματική εμφάνιση τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα, κατά παρέκκλιση του τί συνέβαινε στο παρελθόν, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Στην Ευρώπη πολλές αστικές περιοχές αντιμετωπίζουν **έντονους καύσωνες και ξηρασία** κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η Μεσόγειος γίνεται ξηρότερη καθιστώντας πολλές περιοχές της ευάλωτες σε πυρκαγιές. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι τα ποσοστά υγρασίας στη Βόρεια Ευρώπη συνεχώς αυξάνονται με **πλημμύρες** να παρατηρούνται συχνότερα. Επιπλέον η κλιματική αλλαγή φαίνεται να επηρεάζει την **οικονομία** πολλών αναπτυσσόμενων χώρων όπου άνθρωποι που ζουν εκεί συχνά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το φυσικό τους περιβάλλον και έχουν τους λιγότερους πόρους για να αντιμετωπίσουν το μεταβαλλόμενο κλίμα. Μεταξύ 1980 και 2011 οι πλημμύρες επηρέασαν περισσότερα από 5, 5 εκατομμύρια άτομα και προκάλεσαν άμεσες οικονομικές ζημιές άνω των 90 δισεκατομμυρίων ευρώ. Οι τομείς που στηρίζονται έντονα σε ορισμένες θερμοκρασίες και επίπεδα βροχοπτώσεων όπως η γεωργία, η δασοκομία, η ενέργεια και ο τουρισμός επηρεάζονται ιδιαίτερα. Τέλος οι ανθρώπινες δραστηριότητες του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον επηρεάζουν τη **βιοποικιλότητα** με πολλά είδη ζώων να απειλούνται με εξαφάνιση. Ζώα των οποίων το φυσικό περιβάλλον διαβίωσης βρίσκεται στους πόλους της Γης ή γενικά σε ψυχρά κλίματα, όπως για παράδειγμα οι πολικές αρκούδες, οι φώκιες και οι πιγκουίνοι θα επηρεαστούν ανεπανόρθωτα από την άνοδο της θερμοκρασίας και το λιώσιμο των πάγων. Επίσης, πτηνά θα αναγκαστούν να αποδημήσουν σε διαφορετικές περιοχές από αυτές στις οποίες ζούσαν μέχρι σήμερα.

Κλιματικοί επιστήμονες προσπαθούν να κατανοήσουν το μελλοντικό κλίμα του πλανήτη, χρησιμοποιώντας κλιματικά μοντέλα που παρέχουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν για το μέλλον, τις μεταβολές στα επίπεδα θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, ταχύτητας του ανέμου και άλλων σημαντικών μεταβλητών που διαμορφώνουν το κλίμα μιας περιοχής. Τέτοιου τύπου μεταβολές εκφράζονται με στατιστικά σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση του κλίματος που διαμορφώνεται σε βάθος χρόνου. Έτσι λοιπόν εκτιμάται ότι είναι απαραίτητο -προκειμένου να αποφευχθούν οι σημαντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο φυσικό περιβάλλον- να περιοριστεί η αλόγιστη ανθρώπινη παρέμβαση στο περιβάλλον και να αξιοποιηθούν νέοι τρόποι άντλησης ενέργειας πέραν των ορυκτών καυσίμων που επιδεινώνουν την κλιματική ισορροπία. Ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος για να γίνει αυτό, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.2.1 Ορισμός

Η ανανεώσιμη ενέργεια συλλέγεται από πηγές ενέργειας που έχουν φυσική προέλευση όπως το φως του ήλιου, ο άνεμος, η βροχή, τα κύματα και η γεωθερμική ενέργεια και είναι ανεξάντλητες. Η ανανεώσιμη ενέργεια παρέχει συχνά ενέργεια σε τέσσερις σημαντικούς τομείς: παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση / ψύξη του αέρα και του νερού, υπηρεσίες μεταφοράς.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) σήμερα, συμβάλλουν στη μείωση της περιβαλλοντικής και ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αφού έχουν φυσική προέλευση και δεν εκπέμπουν ρύπους κατά την αξιοποίησή τους. Το ποσοστό συμμετοχής των Α.Π.Ε. στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει πολύ μικρό και δεν είναι ακόμα σε θέση να ικανοποιήσει τα ποσοστά ζήτησης σε ενέργεια που αυξάνεται 4-8% το χρόνο. Δεδομένου ότι

τα παγκόσμια αποθέματα των συμβατικών καυσίμων καταναλώνονται με ραγδαίους ρυθμούς, συμπεραίνουμε ότι η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πρέπει να γίνει σύντομα αρκετά πιο ευρεία (Μπάης, 2004).

Ωστόσο μέχρι σήμερα η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι επαρκής, προκειμένου να επιλυθεί το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα. Αν όμως, η αξιοποίηση τους συνδυαστεί με συμβατικές πηγές ενέργειας αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται η επιθυμητή ενέργεια και να εξοικονομούνται ταυτόχρονα τα ορυκτά καύσιμα. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτή η σταδιακή απομάκρυνση από το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα που εκτιμάται ότι θα υπάρξει στο μέλλον. Το πρόβλημα αυτό λέγεται διαφορετικά ενεργειακός “χειμώνας” (Καλδέλλης, 2005).

1.2.2 Κυριότερες μορφές Α.Π.Ε

Στο σημείο αυτό, θεωρούμε σκόπιμο να αναφέρουμε λίγα στοιχεία για τις κυριότερες και ευρέως εκμεταλλεύσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:

- **Αιολική ενέργεια:** Η αιολική ενέργεια ουσιαστικά είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου, που παράγεται από την μετατροπή ενός μέρους της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης. Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες πηγές ενέργεια όπου η ροή του ανέμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν ονομαστική ισχύ από 600kW έως 9MW. Περιοχές όπου οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι και πιο σταθεροί, όπως οι παράκτιες περιοχές και περιοχές μεγάλα υψόμετρα, αποτελούν προτιμώμενες τοποθεσίες για αιολικά πάρκα.



Σχήμα 2: Αιολικό πάρκο

- **Ηλιακή ενέργεια.** Η ενέργεια που υπάρχει στην ηλιακή ακτινοβολία και προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης, ανέρχεται ετησίως στα $5, 4 \times 10^{24}$ Joules. Ωστόσο ποσοστό της τάξης του 30% επανεκπέμπεται προς στο διάστημα, με αποτέλεσμα ο πλανήτης να απορροφά τελικά κάθε χρόνο, ενέργεια περίπου $3, 8 \times 10^{24}$ Joules. Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται χρησιμοποιώντας μια σειρά από συνεχώς εξελισσόμενες τεχνολογίες. Συγκεκριμένα η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα **παθητικά - ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα**. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μετατρέπουν σε θερμότητα ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Διατάξεις που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν σε θερμότητα είναι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες, ηλιακές δεξαμενές ενώ διατάξεις που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, οι ηλιακοί πύργοι και οι συστοιχίες παραβολικών κατόπτρων.



Σχήμα 3:Φωτοβολταϊκό πάρκο

- **Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Το νερό είναι 800 φορές πυκνότερο από τον αέρα, γεγονός που σημαίνει ότι ένα ρεύμα μέτριας ροής νερού μπορεί να αποφέρει σημαντικά ποσά ενέργειας. Ιστορικά, η υδροηλεκτρική ενέργεια προήλθε από την κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών φραγμάτων και δεξαμενών, τα οποία εξακολουθούν να είναι δημοφιλή στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες στηρίζουν τη λειτουργία τους στην κινητική ενέργεια του νερού η οποία αυξάνεται σημαντικά μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου, λόγω της διαφοράς ύψους. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Καθώς το νερό διέρχεται από τον αγωγό πτώσεως, κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια, ενώ η ποσότητα του ηλεκτρισμού που παράγεται είναι ανάλογη της ποσότητας του νερού και της υψομετρικής διαφοράς. Περίπου το 9% των ενεργειακών αναγκών καλύπτει η υδροηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα. (Twidell and Weir, 2006)



Σχήμα 4:Υδροηλεκτρικό σταθμός

- **Βιομάζα.** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να

χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Ως πηγή ενέργειας, η βιομάζα μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί απευθείας μέσω καύσης για την παραγωγή θερμότητας είτε έμμεσα μετά τη μετατροπή της σε διάφορες μορφές βιοκαυσίμου που συνήθως είναι η βιοαιθανόλη και το βιοαέριο. Η μετατροπή της βιομάζας στα βιοκαύσιμα μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικές μεθόδους που ταξινομούνται ευρέως σε: θερμικές, χημικές και βιοχημικές μεθόδους. Το ξύλο παραμένει η μεγαλύτερη ενεργειακή πηγή βιομάζας σήμερα. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα διαδοθεί πολύ περισσότερο στο μέλλον.



Σχήμα 5: Καύση βιομάζας

- **Γεωθερμική ενέργεια.** Η γεωθερμική ενέργεια προέρχεται από τη θερμική ενέργεια που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Η θερμότητα που χρησιμοποιείται για γεωθερμική ενέργεια μπορεί να είναι από βαθιά μέσα στη Γη, μέχρι τον πυρήνα της Γης - κάτω από 4.000 χιλιόμετρα (6.400 χλμ.). Επίσης είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι τρόποι εκμετάλλευσης ενός γεωθερμικού πεδίου ποικίλουν ανάλογα με το είδος του και τις ιδιότητές του. Συγκεκριμένα η αξιοποίηση γίνεται μέσω δικτύων σωληνώσεων που μεταφέρουν το θερμό ρευστό (ή τον ατμό) στη μονάδα όπου παράγεται η διανέμεται η ενέργεια. Τέλος, η συλλεγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για ηλεκτρική παραγωγή και για τη θέρμανση χώρων και νερού.. (Duffield et al., 2003; Μπάης, 2014)



Σχήμα 6:Γεωθερμική ενέργεια

- **Ενέργεια από τη Θάλασσα:** Η Ενέργεια των κυμάτων που προκαλείται από παλίρροιες εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση στη στάθμη του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνη η οποία δεσμεύει την κινητική ενέργεια των κυμάτων και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία και τη Ρωσία.



Σχήμα 7:Εκμετάλλευση κινητικής ενέργειας κυμάτων

1.3 Αιολική ενέργεια

1.3.1 Εισαγωγή

Όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (εκτός της παλιρροιακής και γεωθερμικής ενέργειας), ακόμη και η ενέργεια στα ορυκτά καύσιμα προέρχονται από τον ήλιο. Ο ήλιος ακτινοβολεί 174.423.000.000.000 kWh ενέργειας στη γη ανά ώρα. Με άλλα λόγια, η γη λαμβάνει $1,74 \times 10^{17}$ W ισχύος. Περίπου το 1-2% της ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Αυτό είναι περίπου 50 έως 100 φορές μεγαλύτερο από την ενέργεια που μετατρέπεται σε βιομάζα από όλα τα φυτά της γης.

Περίπου το 0,2 % της ηλιακής ενέργειας που φτάνει μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γής μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανέμου, δηλαδή σε αιολική

ενέργεια. Υπολογισμοί δείχνουν ότι από το ποσοστό αυτό ,το 35 % διοχετεύεται από την επιφάνεια της Γής σε απόσταση ενός χιλιομέτρου. (Nelson, 2009)

Τα τελευταία χρόνια ολοένα και αυξάνεται το επενδυτικό ενδιαφέρον από ιδιωτικούς και δημόσιους φορείς για την αιολική ενέργεια, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη. Η παγκόσμια ανησυχία σχετικά με την εξάλειψη των συμβατικών μορφών ενέργειας σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οδήγησε στην αύξηση της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, με ρυθμό αύξησης περίπου 30% ετησίως, με ταυτόχρονη μείωση του κόστους λόγω τεχνολογικής ανάπτυξης.

Σημαντική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού γίνεται κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες, όπως στις Η.Π.Α, τον Καναδά, την Κίνα, την Ιταλία κ.α. Στην περίπτωση της Ελλάδας, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται μια ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας κυρίως στο Αιγαίο πέλαγος άλλα και σε πολλές περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας, όπου το αιολικό δυναμικό είναι πλούσιο. Αυτό καθιστά την αιολική ενέργεια μια από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας στη χώρας μας, που μπορεί στο μέλλον να εξαλείψει ολοκληρωτικά τις συμβατές πηγές ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας που δεν παύει να εξαντλείται, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά καύσιμα. Παράλληλα με την εδραίωση της σε πολλές χώρες του κόσμου, πρόκειται να αντικαταστήσει πολλές ρυπογόνες μορφές ενέργειας, επιδρώντας θετικά στην αντιμετώπιση οικολογικών προβλημάτων.

Στην Ελλάδα η αιολική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, καθώς το αιολικό δυναμικό της χώρας είναι ισχυρό και πολύ καλής ποιότητας. Αυτό συντελείται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου στα οποία παρατηρούνται υψηλές τιμές ταχύτητας του ανέμου, για μεγάλη χρονική διάρκεια, το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Επίσης το κόστος λειτουργίας των ανεμογεννητριών είναι σχετικά χαμηλό, με αποτέλεσμα η ενέργεια να παρέχεται φθηνότερα και σε σταθερή τιμή.

Ωστόσο η αιολική ενέργεια δεν είναι μια προβλέψιμη, ούτε σταθερή μορφή ενέργειας και η πυκνότητα ροής που διαθέτει είναι συνήθως χαμηλή. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη κατασκευής μεγάλων αιολικών εγκαταστάσεων έτσι ώστε να γίνει εφικτή η εκμετάλλευση της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος δεν υπάρχει η δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, αφού πρακτικά μόνο ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου μπορεί να αξιοποιηθεί και να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Αυτό οφείλεται στις αεροδυναμικές και μηχανικές απώλειες, οι οποίες είναι δύσκολο να αποφευχθούν με βάση τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα.

1.3.2 Ισχύς του ανέμου

Μια ανεμογεννήτρια αποδίδει την εισερχόμενη ισχύ της μετατρέποντας τη δύναμη του ανέμου σε μια ροπή στρέψης (δύναμη περιστροφής) που επενεργεί στις λεπίδες του ρότορα. Οι Α/Γ εγκαθίστανται σε συστοιχίες σε μια χερσαία ή θαλάσσια έκταση που ονομάζεται **αιολικό πάρκο**. Είναι αυτονόητο ότι όσο ισχυρότεροι άνεμοι πνέουν στη θέση που εγκαθίσταται ένα αιολικό πάρκο, τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια θα παράγει αυτό, στη διάρκεια ενός έτους. Η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρει ο άνεμος στον δρομέα εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα, το εμβαδόν που σαρώνουν τα πτερύγια του του δρομέα και την ταχύτητα του ανέμου. Η κινητική ενέργεια ενός κινούμενου σώματος είναι ανάλογη της μάζας (ή του βάρους) του και η κινητική ενέργεια στον άνεμο εξαρτάται έτσι από την πυκνότητα του αέρα, δηλαδή τη μάζα του ανά μονάδα όγκου. Με άλλα λόγια, όσο "βαρύτερος" ο αέρας που προσπίπτει στα πτερύγια του δρομέα, τόσο περισσότερη ενέργεια δέχεται ο στρόβιλος. Μια τυπική ανεμογεννήτρια των 1.000 kW έχει διάμετρο δρομέα 54 μέτρα που σαρώνει μια επιφάνεια 2.300 τετραγωνικών μέτρων. Η

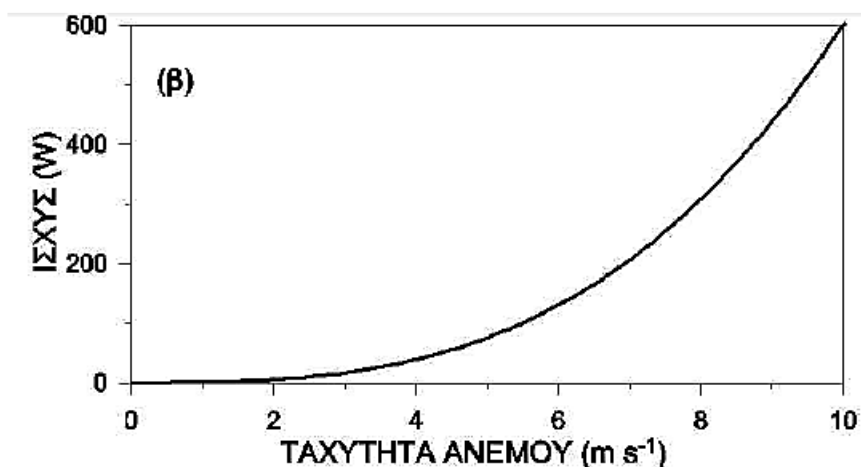
περιοχή του ρότορα καθορίζει πόση ενέργεια μια ανεμογεννήτρια είναι σε θέση να συλλέξει από τον άνεμο. Η εξίσωση που δίνει την ισχύ του ανέμου, που διέρχεται από μία επιφάνεια A, κάθετη στη διεύθυνση του, με ταχύτητα V, παίρνει τη μορφή:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 [W] (1)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες πίεσης. Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του και ευθέως ανάλογη της πυκνότητας του, η οποία μεταβάλλεται τόσο με ύψος, όσο και με τη θερμοκρασία και την πίεση. Αυτό επιβεβαιώνεται αν εξετάσουμε την καταστατική εξίσωση που δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{P}{RT} (2)$$

Συμπεραίνουμε ότι η πυκνότητα είναι ανάλογη της ατμοσφαιρικής πίεσης και αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας. Έτσι το χειμώνα η πυκνότητα θα είναι μεγαλύτερη, όπως αναμένεται να είναι και η διαθέσιμη αιολική ισχύς.



Σχήμα 8: Διαγράμματα ισχύος -ταχύτητας ανέμου (Μπάης 2014)

Συμπεραίνουμε επίσης ότι η ισχύς είναι ευθέως ανάλογη με το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία προσκρούει ο άνεμος. Αύξηση δηλαδή της επιφάνειας θα επιφέρει αύξηση της ωφέλιμης ισχύος. Οι ταχύτητες του ανέμου που επικρατούν σε μια περιοχή καθορίζουν τις διαστάσεις των ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες με μεγάλη διάσταση απαιτούν περισσότερη αιολική ενέργεια για να λειτουργήσουν, οπότε η εγκατάστασή τους σε περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό, είναι ανώφελη. (Wagner and Mathur, 2009)

Από την ισχύ που διαθέτει ο άνεμος, λόγω της ταχύτητας του, μόνο ένα μέρος μπορεί να προσληφθεί από τα πτερύγια της Α/Γ (του δρομέα). Η ισχύς P_0 που προσλαμβάνεται από τα πτερύγια είναι ίση με τη διαφορά της ισχύος του ανέμου πριν και μετά το δίσκο που σαρώνεται από αυτά. Αν μετά την Α/Γ η ταχύτητα του ανέμου έχει ελαττωθεί σε V_0 , η ισχύς που προσέλαβαν τα πτερύγια είναι (Μαρνέλλος, 2015):

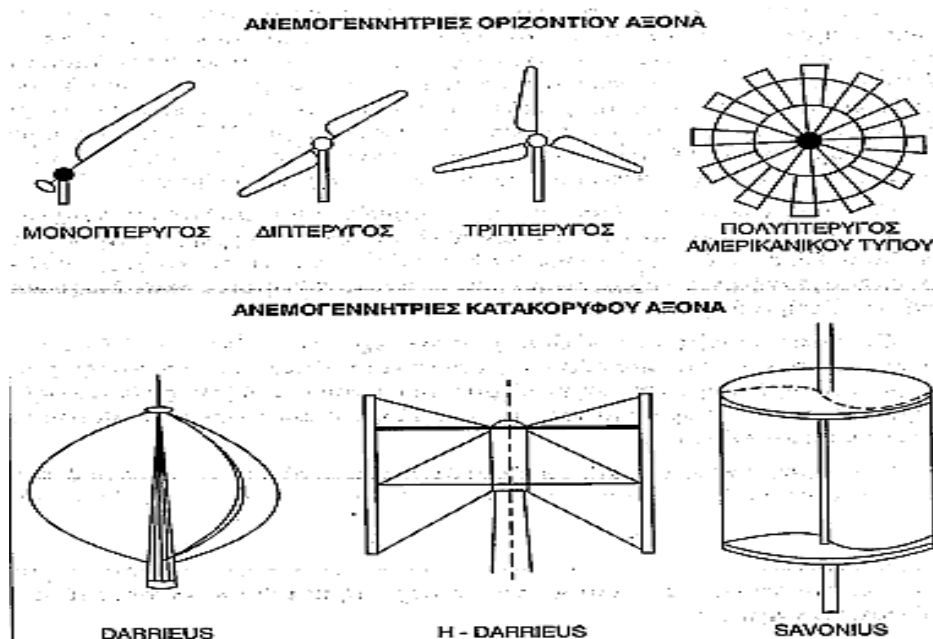
$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V^2 - V_0^2) (3)$$

όπου: V [m/s] η ταχύτητα του ανέμου πριν από το επίπεδο που σαρώνουν τα πτερύγια. V_0 [m/s] η ταχύτητα του ανέμου μετά από αυτό. Η Α/Γ αναχαιτίζει τη ροή του ανέμου σε όλη την έκταση που σαρώνεται από τα πτερύγια της, κατά την περιστροφή τους, παρά το γεγονός ότι διαθέτει συνήθως 2 – 3 πτερύγια, που καλύπτουν μόνο το 5 – 10 % της επιφάνειας αυτής. Αγνοώντας φαινόμενα ρευστοδυναμικής και εξετάζοντας μακροσκοπικά το επίπεδο που σαρώνεται από τα πτερύγια, η ταχύτητα στο επίπεδο αυτό είναι ίση με τη μέση τιμή V_{mean} των ταχυτήτων του ανέμου, πριν και μετά το επίπεδο αυτό (Μαρνέλλος, 2015):

$$V_{mean} = \frac{V+V_0}{2} [m/s] \quad (4)$$

1.3.3 Ανάλυση των ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Τα τελευταία χρόνια λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών είναι ραγδαία. Αποτέλεσμα είναι να εντάσσονται σταδιακά στα δίκτυα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, νέοι τύποι ανεμογεννητριών σε πολλές χώρες παγκοσμίως. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε **οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα**. Ανάλογα το ύψος του δρομέα, τη διάμετρο των πτερυγίων και την παραγόμενη ισχύ διακρίνονται σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανεμογεννήτριες. Ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους, διακρίνονται σε ολιγοπτέρυγες και πολυπτέρυγες, ενώ ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους, διακρίνονται σε αργόστροφες και ταχύστροφες. (Καλδέλλης, 2005; Γελεγενής και Αξαόπουλος, 2005; Twidell and Weir, 2006).



Σχήμα 9: Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών (Καλδέλλης, 2005)

Ευρέως διαδεδομένες ανεμογεννήτριες, είναι αυτές που διαχωρίζουν τη λειτουργία τους με βάση τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής. Οι ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα έχουν προσανατολισμένο τον άξονα περιστροφής τους παράλληλα προς την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ οι κατακόρυφου άξονα, κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου. (Καλδέλλης, 2005; Sathyajith, 2006). Ο δρομέας της ανεμογεννήτριας τοποθετείται σε έναν πύργο συγκεκριμένου ύψους (συνήθως πενήντα μέτρα), με σκοπό να εκτίθεται στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου.

Δεδομένου ότι η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται συχνά, η ανεμογεννήτρια πρέπει να στρέφεται τα πτερύγια της κάθετα στην στη διεύθυνση του ανέμου για να παραλαμβάνουν τη μέγιστη ισχύ. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις μικρές ανεμογεννήτριες, οι οποίες στρέφονται αυτόματα με τη χρήση είτε του αεροδυναμικού πτερυγίου είτε με του ανεμομέτρου έλικας κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

Τα κύρια μέρη μια ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονας είναι τα εξής:

1. Τον πύργο: Είναι κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένος από χάλυβα και συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα. Είναι παρόμοιας κατασκευής με τους πύργους που στηρίζουν τα φώτα σε γήπεδα και εθνικούς δρόμους.

2. Τον θάλαμο που περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα (κύριος άξονας, σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων και ηλεκτρογεννήτρια) :

- Ο **κύριος άξονας** με το σύστημα πέδησης (φρένα) είναι παρόμοιος με τον άξονα των τροχών ενός αυτοκινήτου με υδραυλικά δισκόφρενα.

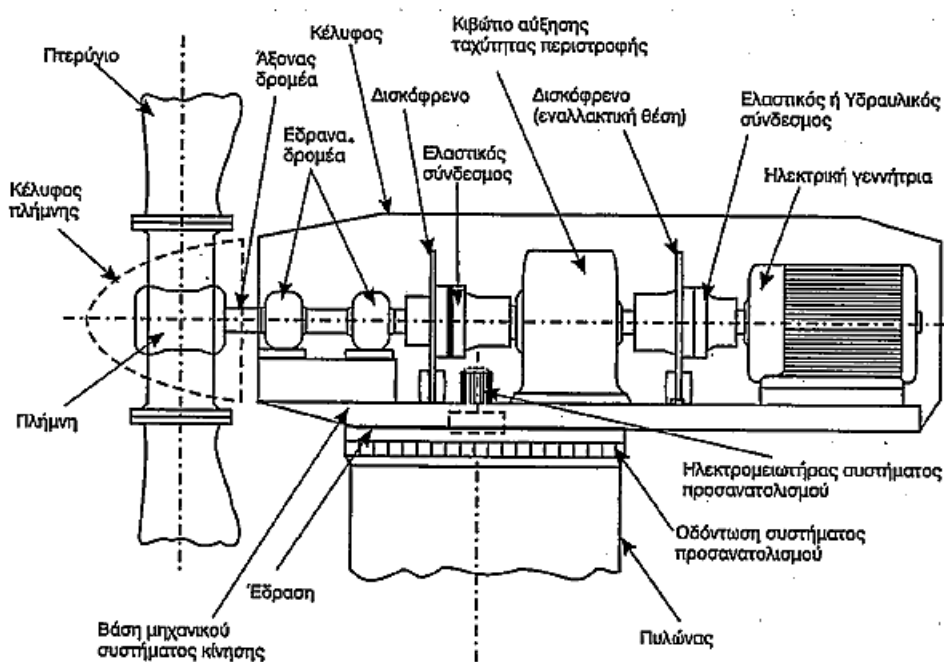
- Το **κιβώτιο ταχυτήτων** είναι παρόμοιας κατασκευής με εκείνο του αυτοκινήτου μας

- Η **ηλεκτρογεννήτρια** είναι παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ή με τις γεννήτριες που έχουμε στα εξοχικά μας.

3. Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας. Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα μικροελεγκτών και «φροντίζουν» για την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε όλες τις συνθήκες.

4. Τα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά (υαλονήματα και ειδικές ρητίνες), παρόμοια με αυτά που κατασκευάζονται τα ιστιοπλοϊκά σκάφη, σχεδιασμένα για να αντέχουν σε μεγάλες καταπονήσεις.

Τυπική μορφή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

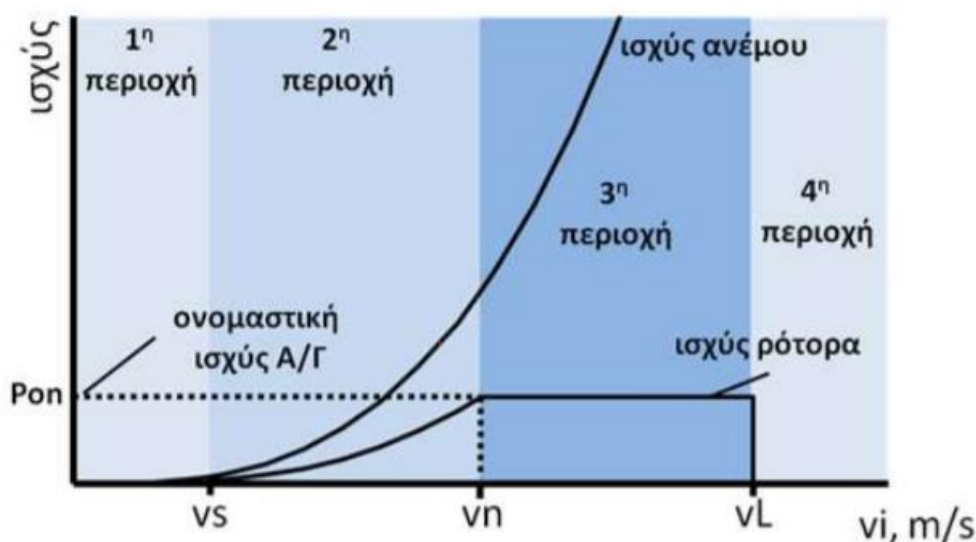


Σχήμα 10: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Καλδέλλης, 2005)

Δεν υπάρχουν αυστηρά κριτήρια που να διαχωρίζουν τους ανεμοκινητήρες ανάλογα με το μέγεθος και τη μηχανική ισχύ τους. Ανεμοκινητήρες με ισχύ κάτω των 30kW χαρακτηρίζονται ως μικροί, ενώ αυτοί με ισχύ μεταξύ 30-300 kW χαρακτηρίζονται ως μεσαίοι. Αυτοί με ισχύ άνω των 300kW, χαρακτηρίζονται ως μεγάλοι. (Καλδέλλης, 2005)

Χαρακτηριστικές ταχύτητες του ανέμου

Συνήθως, οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί ώστε να αρχίζουν να λειτουργούν με ταχύτητες ανέμου περίπου 3 μέτρα το δευτερόλεπτο. Αυτό ονομάζεται **ταχύτητα έναρξης** λειτουργίας των ανεμογεννητριών (**v_s**). Η μπλε περιοχή στα αριστερά δείχνει τη μικρή ποσότητα ενέργειας που χάνουμε λόγω του γεγονότος ότι ο στρόβιλος περνάει ξεκινά να περιστρέφεται για ταχύτητα ανέμου πάνω από τα 5 m/s. Μεταξύ της ταχύτητας (ανέμου) έναρξης v_s και της **ονομαστικής ταχύτητας ανέμου v_n** (η οποία είναι χαρακτηριστική της κάθε Α/Γ), η Α/Γ λειτουργεί με σταθερό συντελεστή απόδοσης c_p , ίσο με την ονομαστικής της απόδοση. Επίσης μεταξύ της ταχύτητας έναρξης και της ονομαστικής ταχύτητας των ανεμογεννητριών η ισχύς του ανέμου και η ισχύς του ρότορα αυξάνονται εκθετικά. Η τρίτη περιοχή ταχυτήτων του ανέμου εκτείνεται από την ονομαστική ταχύτητα v_n , έως την **οριακή ταχύτητα, v_L** , στην οποία το φρένο ακινητοποιεί εκ νέου τον ρότορα και ο θάλαμος στρέφεται έτσι ώστε το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων να βρεθούν παράλληλα στη διεύθυνση του ανέμου ($v_n < v_i < v_L$). Στο ίδιο εύρος ταχυτήτων ο συντελεστής απόδοσης της ανεμογεννήτριας αρχίζει και μειώνεται μέχρι την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας, στην οποία μηδενίζεται. Στην περιοχή αυτή ταχυτήτων του ανέμου ($v_n < v_i < v_L$) (Μαρνέλλος, 2015).



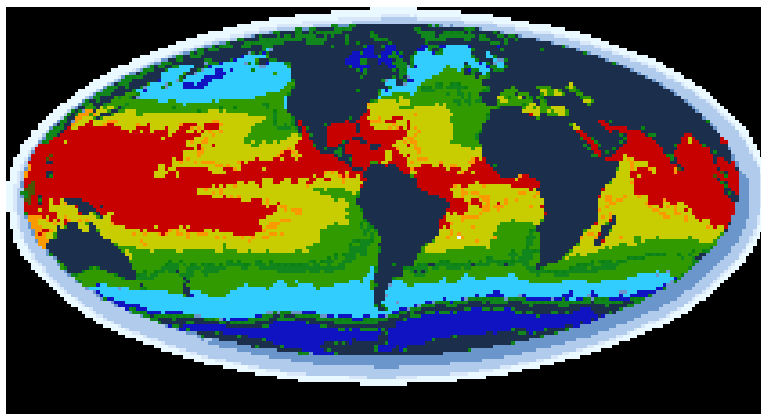
Σχήμα 11: Διάγραμμα Ισχύος (ανέμου-παραγόμενης)-Ταχύτητας ανέμου. Πηγή: Μαρνέλλος, (2015)

Ο ρότορας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, προσλαμβάνοντας από τον άνεμο σταθερή ισχύ. Η ανεμογεννήτρια θα προγραμματιστεί να σταματήσει σε υψηλές ταχύτητες ανέμου πάνω από τα 25 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, προκειμένου να αποφευχθεί η βλάβη του στρόβιλου ή του περιβάλλοντος χώρου του. Η ταχύτητα ανέμου σταματήματος ονομάζεται ταχύτητα αποσύνδεσης. Η μικρή μπλε περιοχή προς τα δεξιά στο παραπάνω διάγραμμα αντιπροσωπεύει αυτή την απώλεια ισχύος.

1.4 Αιολικό δυναμικό

1.4.1 Γενική κυκλοφορία ανέμου

Ο άνεμος δημιουργείται από τις διαφορές θερμοκρασίας που αναπτύσσονται στην ατμόσφαιρα της Γης. Οι περιοχές γύρω από τον ισημερινό, σε γεωγραφικό πλάτος 0° , θερμαίνονται περισσότερο από τον ήλιο από ό,τι ο υπόλοιπος κόσμος λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας της Γης. Έτσι οι ακτίνες του Ήλιου πέφτουν όλο και πιο πλάγια καθώς κινούμαστε σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Οι θερμές περιοχές υποδεικνύονται με “ζεστά” χρώματα, κόκκινο, πορτοκαλί και κίτρινο σε αυτή την υπέρυθη εικόνα της θερμοκρασίας της θάλασσας (που ελήφθη από δορυφόρο της NASA, NOAA-7 τον Ιούλιο του 1984).



Σχήμα 12:Επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας(Ιούλιος 1984)

Ο ζεστός αέρας είναι ελαφρύτερος από τον κρύο αέρα και θα ανέβει στον ουρανό μέχρι να φτάσει σε υψόμετρο περίπου 10 χλμ (6 μίλια) και θα εξαπλωθεί στον Βορρά και τον Νότο. Εάν η σφαίρα δεν περιστρεφόταν, ο αέρας θα έφτανε απλά στο βόρειο πόλο και στο νότιο πόλο, θα βυθιζόταν στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και θα επέστρεφε στον Ισημερινό. Δεδομένου ότι η σφαίρα περιστρέφεται, κάθε κίνηση στο βόρειο ημισφαίριο εκτρέπεται προς τα δεξιά, αν το εξετάσουμε από τη δική μας θέση στο έδαφος ενώ στο νότιο ημισφαίριο εκτρέπεται προς τα αριστερά). Αυτή η εμφανής δύναμη κάμψης είναι γνωστή ως η **δύναμη Coriolis**. (Ονομάστηκε από τον Γάλλο μαθηματικό Gustave Gaspard Coriolis 1792-1843). Στο βόρειο ημισφαίριο ο άνεμος τείνει να περιστρέφεται αριστερόστροφα καθώς πλησιάζει μια περιοχή χαμηλής πίεσης ενώ στο νότιο ημισφαίριο ο άνεμος περιστρέφεται δεξιόστροφα γύρω από περιοχές χαμηλής πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο η δύναμη Coriolis επηρεάζει την κατεύθυνση του ανέμου στον πλανήτη. Η παγκόσμια κυκλοφορία των ανέμων ξεκινά από τον ισημερινό και κινείται σε υψηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας προς το νότιο και βόρειο πόλο. Περίπου σε απόσταση γεωγραφικού πλάτους 30° και από τα δύο ημισφαίρια, η δύναμη Coriolis αποτρέπει τον αέρα από το να κινηθεί περαιτέρω προς τον Βορρά ή τον Νότο. Σε αυτό το γεωγραφικό πλάτος υπάρχει μια περιοχή υψηλής πίεσης, καθώς ο αέρας αρχίζει να κινείται προς της επιφάνεια της Γης. Καθώς ο άνεμος ανεβαίνει από τον ισημερινό θα υπάρχει μια περιοχή χαμηλής πίεσης (υποπίεσης), κοντά στο επίπεδο του εδάφους που θα προσελκύει ανέμους από το Βορρά και το Νότο. Στους Πόλους, θα υπάρξει υψηλή πίεση λόγω της ψύξης του αέρα. Λαμβάνοντας υπόψη τη δύναμη κάμψης της δύναμης Coriolis, έχουμε τα ακόλουθα γενικά αποτελέσματα για την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου.

Πίνακας 1:Επικρατούσες διευθύνσεις ανέμων

Latitude	90-60°N	60-30°N	30-0°N	0-30°S	30-60°S	60-90°S
Direction	NE	SW	NE	SE	NW	SE

Οι επικρατούσες κατευθύνσεις του ανέμου είναι σημαντικές για την τοποθέτηση ανεμογεννητριών, αφού προφανώς θέλουμε να τις τοποθετήσουμε στις περιοχές με τα λιγότερα εμπόδια από τις επικρατούσες κατευθύνσεις του ανέμου. Ωστόσο, η τοπική γεωγραφία μπορεί να επηρεάσει τα γενικά αποτελέσματα στον παραπάνω πίνακα.

Το τμήμα της ατμόσφαιρας στο οποίο συμβαίνουν οι σημαντικές ατμοσφαιρικές μεταβολές της διεύθυνσης του ανέμου είναι η τροπόσφαιρα. Η τροπόσφαιρα, η οποία εκτείνεται σε υψόμετρο περίπου 11 χιλιομέτρων (36.000 πόδια), είναι εκεί όπου τα καιρικά φαινόμενα και το φαινόμενο του θερμοκηπίου λαμβάνουν χώρα.

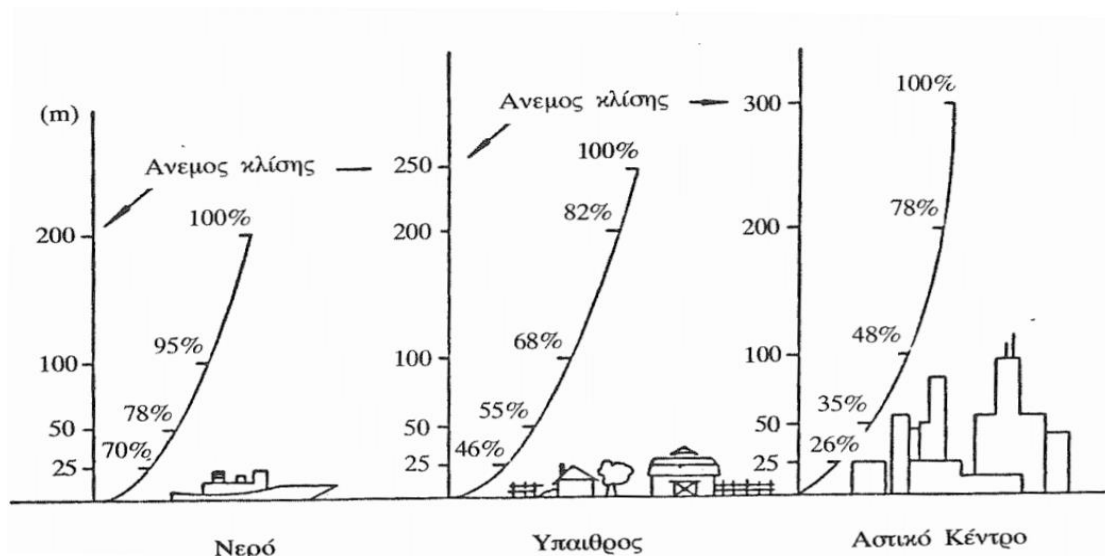
1.4.2 Γεωστροφικοί-Επιφανειακοί άνεμοι

Οι άνεμοι που διέπονται από τις επικρατούσες διευθύνσεις ονομάζονται γεωστροφικοί άνεμοι και η μέτρησή τους γίνεται με μετεωρολογικά αερόστατα. Οι άνεμοι αυτοί είναι στην πραγματικότητα οι **γεωστροφικοί άνεμοι**. Οι γεωστροφικοί άνεμοι οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε διαφορές θερμοκρασίας και συνεπώς σε διαφορές πίεσης και δεν επηρεάζονται πολύ από την επιφάνεια της γης. Ο γεωστατικός άνεμος βρίσκεται σε υψόμετρα άνω των 1000 μέτρων (3300 πόδια) πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Οι άνεμοι επηρεάζονται πολύ από την επιφάνεια του εδάφους σε υψόμετρα έως 100 μέτρα. Ο άνεμος θα επιβραδυνθεί από την τραχύτητα της επιφάνειας της γης και τα εμπόδια που διαμορφώνουν την τραχύτητα του ανέμου. Οι κατευθύνσεις του ανέμου κοντά στην επιφάνεια θα είναι ελαφρώς διαφορετικές από την κατεύθυνση του γεωστροφικού ανέμου λόγω της περιστροφής της Γης.

Όταν ασχολούμαστε με την αιολική ενέργεια, μας απασχολούν κυρίως οι **τοπικοί άνεμοι** και πώς υπολογίζουμε το χρησιμοποιούμενο ενεργειακό περιεχόμενο του ανέμου. Λαμβάνοντας υπόψη και την περιστροφή της Γης (επίδραση δύναμης Coriolis) οι διευθύνσεις των επιφανειακών ανέμων θα διαφέρουν από αυτές των γεωστροφικών ανέμων. Αν και οι παγκόσμιοι άνεμοι είναι σημαντικοί για τον προσδιορισμό των επικρατούντων ανέμων σε μια δεδομένη περιοχή, οι τοπικές κλιματολογικές συνθήκες μπορούν να ασκήσουν επιρροή στις πιο κοινές κατευθύνσεις του ανέμου. Όταν οι μεγαλύτερης κλίμακας άνεμοι είναι ασθενείς τότε οι τοπικοί άνεμοι μπορούν να κυριαρχήσουν στη διαμόρφωση του ανέμου σε μια περιοχή.

1.4.3 Μεταβολή Ταχύτητας του Ανέμου με το Ύψος

Οι τοπικοί άνεμοι που εμφανίζονται σε μια περιοχή, δημιουργούν λόγω ιξώδους ένα μικρό οριακό στρώμα στα κατώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας που ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η τοπογραφία της κάθε περιοχής, η τραχύτητα του εδάφους και η ταχύτητα του ανέμου είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η τραχύτητα του εδάφους διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από την ύπαρξη εμποδίων(ψηλά κτήρια, συστοιχία δέντρων κ.α), που αναταράσσουν τη ροή του ανέμου. Τα εμπόδια αυτά κάνουν τη ροή του ανέμου τυρβώδη με την ταχύτητα του ανέμου να μειώνεται και την τύρβη να αυξάνεται.



Σχήμα 13: Μεταβολή του ύψους του οριακού στρώματος ανάλογα με την τραχύτητα του εδάφους. Πηγή: Βαφειάδης, (2015)

Ένα σημαντικό κριτήριο που αξιολογείται για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου σε μια περιοχή είναι η τραχύτητα του εδάφους, καθώς τα εμπόδια της γύρω περιοχής μπορεί να μειώσουν σημαντικά την αποδοτικότητα λόγω της τυρβώδους ροής. Η τοποθέτηση μιας ανεμογεννήτριας θα πρέπει να βρίσκεται εκτός του οριακού στρώματος έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από τη τύρβη του ανέμου.

Σε περιοχές με ανώμαλη τοπογραφία, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά ακόμα και μεταξύ περιοχών που απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους. Η επίδραση της ανωμαλίας του εδάφους στην ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να γίνει μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και εργαλείων που περιγράφουν τη ροή του ανέμου.

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με την αύξηση του ύψους από το έδαφος. Η μεταβολή αυτή είναι αξιοσημείωτη μέχρι τα πρώτα 100m από το έδαφος. Υπάρχουν πολλές σχέσεις που περιγράφουν αυτή τη μεταβολή. Δύο από τις πιο σημαντικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταβολής του ανέμου είναι ο λογαριθμικός και ο εκθετικός νόμος που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Εκθετικός νόμος: } U(z) = \frac{U^*}{k} \cdot \ln \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5)$$

$$\text{Λογαριθμικός νόμος: } U(z) = U(z_{ref}) \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

Όπου: $U(z)$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z

U^* : η ταχύτητα τριβής, εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας και την πυκνότητα του αέρα

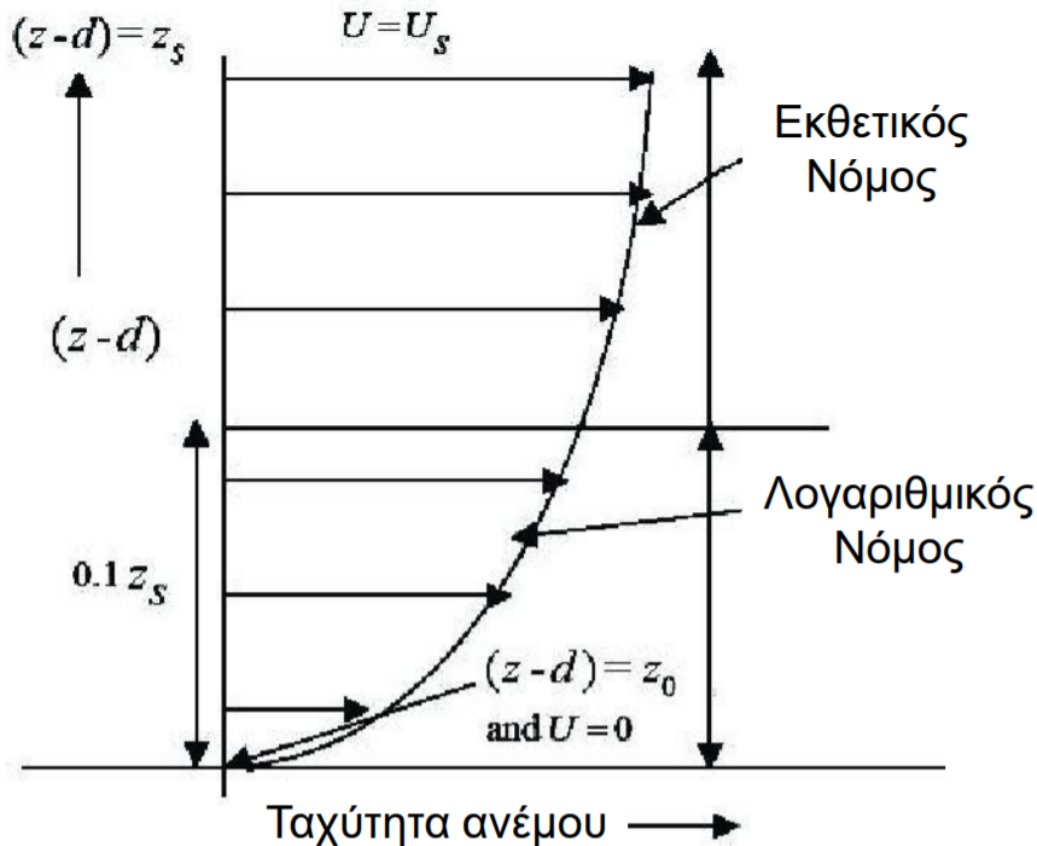
k : η σταθερά von Karman ($k=0.35$)

z_0 : η παράμετρος τραχύτητας

$1/\alpha$: ο εκθέτης του εκθετικού νόμου που σχετίζεται με τη μορφή της επιφάνειας του εδάφους:

$1/\alpha=0.17$: για ανοικτά πεδία (θάλασσα ή χώρος εντός αεροδρομίου) $1/\alpha=0.20$: για μικρές πόλεις και χωριά $1/\alpha=0.25$: για πόλεις με μεγάλες και πολυώροφες κατασκευές

Έχει παρατηρηθεί ότι η κατακόρυφη κατανομή ακολουθεί τον εκθετικό νόμο ενώ στα μεγαλύτερα ύψη η μαθηματική έκφραση του λογαριθμικού νόμο δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα για την κατανομή της ταχύτητας.



Σχήμα 14: Περιοχές του ατμοσφαιρικού στρώματος που περιγράφονται από τον εκθετικό και λογαριθμικό νόμο. Πηγή: Βαφειάδης, (2015)

1.4.4 Κατανομή ταχύτητας ανέμου

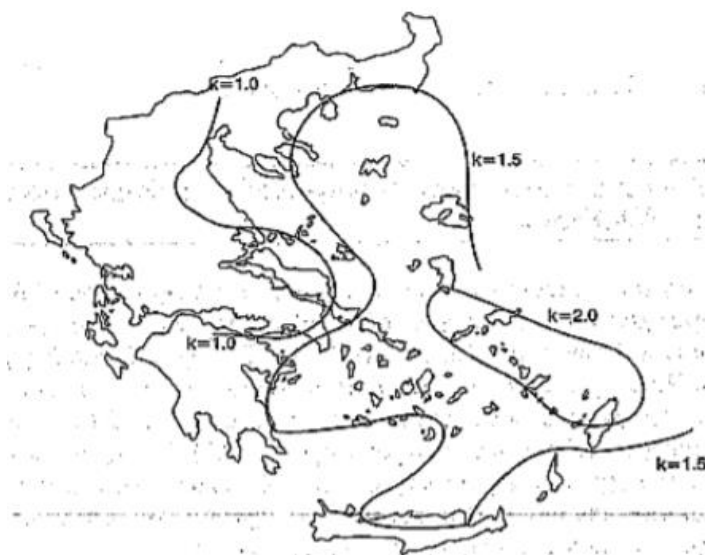
Είναι πολύ σημαντικό για την αιολική βιομηχανία να είναι σε θέση να περιγράψει τη μεταβολή των ταχυτήτων του ανέμου. Οι σχεδιαστές στροβίλων χρειάζονται τις πληροφορίες για να βελτιστοποιήσουν το σχεδιασμό των στροβίλων τους, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής. Οι επενδυτές στροβίλων χρειάζονται τις πληροφορίες για να υπολογίσουν το εισόδημά τους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο ανέμου κατά τη διάρκεια ενός έτους, επαναλαμβάνεται με πολύ μικρές αποκλίσεις από έτος σε έτος. Οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, στη διάρκεια ενός έτους, περιγράφονται από την κατανομή πιθανοτήτων (ή συχνοτήτων) Weibull, η οποία ορίζεται από την εξίσωση:

$$h_i = \frac{\kappa}{c} \cdot \left(\frac{U_x}{c}\right)^{\kappa-1} e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^\kappa} \quad (7) \text{ όπου:}$$

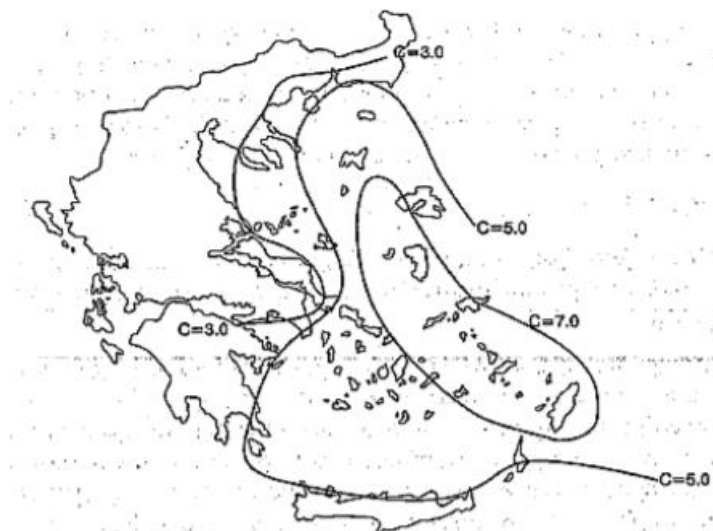
- κ : συντελεστής σχήματος (αδιάστατος)
- c : συντελεστής κλίμακας (m/s), παράγοντας μεγέθους
- h_i [%]: η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι ίση με V_i [m/s] ή η % συχνότητα της ταχύτητας V_i

Μικρές τιμές της k , δηλώνουν μικρές ταχύτητες του ανέμου, αλλά μεγάλη διαθέσιμη αιολική ενέργεια, λόγω του μεγαλύτερου εύρους ταχυτήτων που παρουσιάζεται σε μια περιοχή. Αντίστοιχα, μεγάλες τιμές της k , σημαίνει ότι υπάρχουν μέρες που έχουν δυνατούς ανέμους και ένας ίσος αριθμός ημερών περιγράφεται από χαμηλές ταχύτητες του ανέμου. Περιοχές με $k=2$, χαρακτηρίζονται από αρκετές μέρες που έχουν μικρότερες ταχύτητες του ανέμου από τη μέση τιμή, καθώς και από ένα μικρό αριθμό ημερών που έχουν δυνατούς ανέμους, ενώ τέλος, μεγάλες τιμές της παραμέτρου c χαρακτηρίζονται από υψηλής έντασης ανέμους. (Jimmy et al., 2007). Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο χάρτης της Ελλάδας με τις τιμές των συντελεστών της κατανομής Weibull.

Οι παράμετροι k και c ποικίλουν ανάλογα με την τοποθεσία, επειδή εξαρτώνται από τη διαμόρφωση του εδάφους, καθώς και από τις κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στην περιοχή του Αιγαίου παρατηρείται ότι οι τιμές της παραμέτρου k είναι κυρίως μεταξύ του 1.3-2, ενώ πολλές φορές η τιμή του k ξεπερνά το 2, γεγονός που σηματοδοτεί την ύπαρξη υψηλού και καλής ποιότητας αιολικού δυναμικού. Αντίστοιχα, οι τιμές της παραμέτρου c κυμαίνονται μεταξύ του 5-7, ενώ κατά την ύπαρξη υψηλών ταχυτήτων ανέμου μπορεί να πλησιάσει και το 10. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι τιμές των k και c , αποδεικνύουν την ύπαρξη ενός υψηλού αιολικού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο, ενός από τα μεγαλύτερα που παρουσιάζονται στην Ευρώπη. (Redlinger et al., 2002; Καλδέλλης, 2005). Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο χάρτης της Ελλάδας με τις τιμές των συντελεστών της κατανομής Weibull



Σχήμα 15: Γεωγραφική διανομή παραμέτρου k (Καλδέλλης 2005)



Σχήμα 16:Γεωγραφική διανομή παραμέτρου C (Καλδέλλης, 2005)

Εάν μετρήσουμε τις ταχύτητες ανέμου καθ 'όλη τη διάρκεια ενός έτους, θα παρατηρήσετε ότι στις περισσότερες περιοχές οι ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ οι μέτριοι και δροσεροί άνεμοι είναι αρκετά συνηθισμένοι.

Η διακύμανση των τιμών του ανέμου για μια τυπική τοποθεσία περιγράφεται συνήθως χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη κατανομή Weibull, όπως φαίνεται στην εικόνα. Αυτή η συγκεκριμένη περιοχή έχει μέση ταχύτητα ανέμου 7 μέτρα ανά δευτερόλεπτο και το σχήμα της καμπύλης προσδιορίζεται από μια επονομαζόμενη παράμετρο μεγέθους που ισούται με 2.

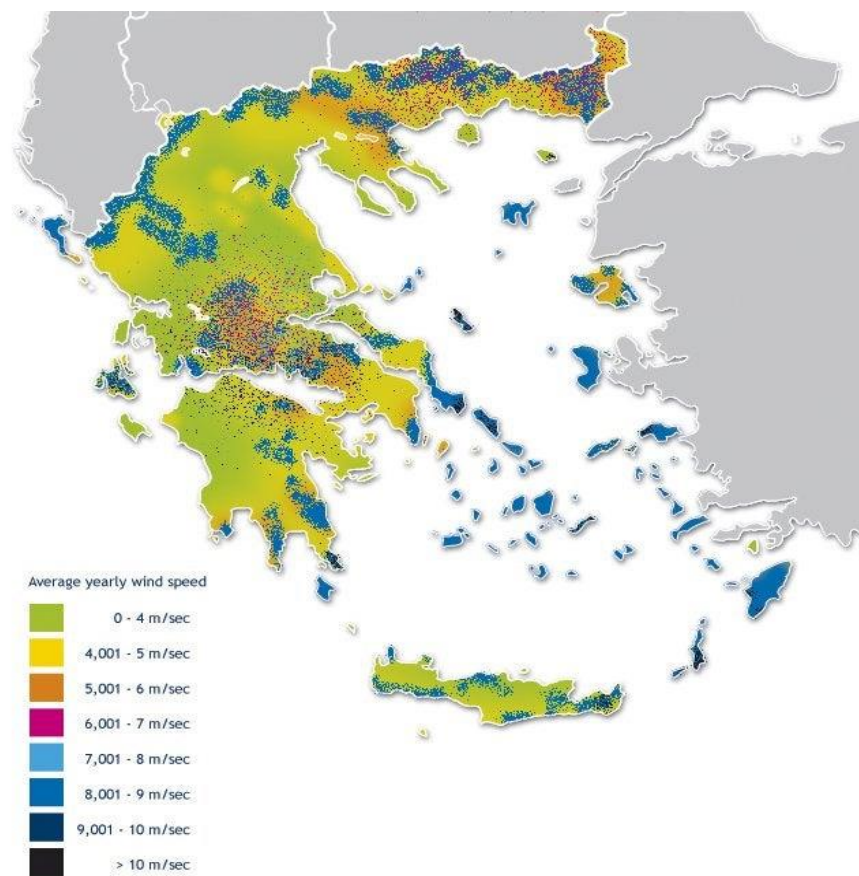
1.5 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

1.5.1 Εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13, 6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Η χώρα μας χαρακτηρίζεται από εύκρατο κλίμα, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται και από ευνοϊκή διαμόρφωση του εδάφους της. Τα δύο αυτά στοιχεία είναι οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν πολύ καλό αιολικό δυναμικό σε πολλές περιοχές της χώρας.. Οι περιοχές με το υψηλότερο αιολικό δυναμικό είναι: τα νησιά του Αιγαίου, η Κρήτη, η ΝΑ. Πελοπόννησος, η Εύβοια και ορισμένες περιοχές της Θράκης (βλέπε σχ.17). Τα ελληνικά νησιά, κυρίως του Αιγαίου, πρωτοπορούν στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με την εγκατάσταση νέων αιολικών σταθμών να σημειώνει μια σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια. (Καλδέλλης, 2005)

Μετά την Αγγλία, την Ιρλανδία και την Δανία, η Ελλάδα διαθέτει σε ορισμένες περιοχές ένα από τα ισχυρότερα αιολικά δυναμικά στην Ευρώπη με ταχύτητες του ανέμου που ξεπερνούν τα 7m/s. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό είναι της τάξης των 11.000-14.000MW και εκτιμάται ότι καλύπτει το 13, 6% του συνόλου της ηλεκτρικής ζήτησης της χώρας. Αν και το αιολικό δυναμικό της χώρας είναι εξαιρετικής ποιότητας ,το επενδυτικό ενδιαφέρον στην αιολική ενέργεια σημειώνει αύξηση τα τελευταία μόνο χρόνια και η πολιτική για στροφή στην επέκταση των αιολικών συστημάτων έχει καθυστερήσει σημαντικά. (Δαγκαλίδης, 2010)



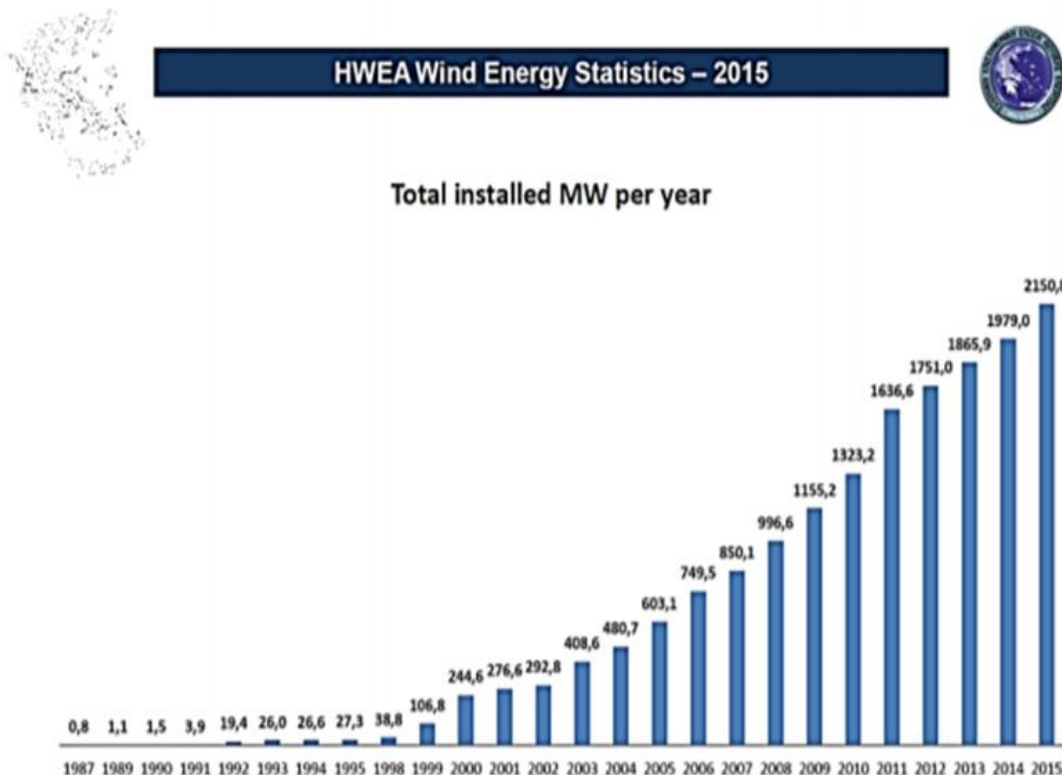
Σχήμα 17:Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα

Βέβαια, ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα. Για αυτό έχει συμβάλει σημαντικά η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις Α.Π.Ε., η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις ήπιες μορφές ενέργειας σε όλες τις χώρες της Ε.Ε ,προκειμένου να περιοριστεί η χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας. Στην Ελλάδα παρέχονται ισχυρότατα κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας αιολικής ισχύος.

Της τάξης των 171, 8MW ήταν η συνολική αιολική ισχύς που εγκαταστάθηκε το 2015. Πέραν αυτής της νέας ισχύος, 43 νέα αιολικά πάρκα, συνολικής ισχύος 210, 7MW ξεκίνησαν να κατασκευάζονται στο τέλος του 2015. Το σύνολο της αιολικής ισχύος που βρισκόταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία ήταν 2150, 8MW στο τέλος του 2015 σημειώνοντας μια αύξηση κατά 8, 7% σε σχέση με το 2014. Από αυτά, τα 322, 6MW κατανέμονται στα μη-διασυνδεδεμένα νησιά και τα 1828, 2MW στο διασυνδεδεμένο σύστημα.

Στόχος της Ελλάδας είναι μέχρι το 2020 το 24, 5% της συνολικής παραγωγής σε ηλεκτρισμό να προέρχεται από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, θα πρέπει το ποσό της νέας εγκατεστημένης ισχύος να ανέρχεται στα 600MW ανά έτος και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς το 2020 να προσεγγίζει τα 7, 5GW.Μπορούμε να είμαστε αισιόδοξοι, ότι το επενδυτικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Η αισιοδοξία για επέκταση των αιολικών τεχνολογιών σε ολόκληρη τη χώρα ενισχύεται από κατασκευαστικούς οίκους αιολικών τεχνολογιών που επιδεικνύουν σημαντικό ενδιαφέρον για την ελληνική αγορά, εκτιμώντας ότι η εγχώρια αιολική αγορά θα εξελιχθεί σημαντικά στο μέλλον. Έτσι κρίνεται απαραίτητο η πολιτική του κράτους και των τοπικών κοινωνιών ,να ευνοήσει δραστηριότητες επενδυτικού ενδιαφέροντος για

επέκταση των αιολικών τεχνολογιών προκειμένου να αναπτυχθεί η αιολική ενέργεια στη χώρα μας. (Καλδέλλης, 2005)



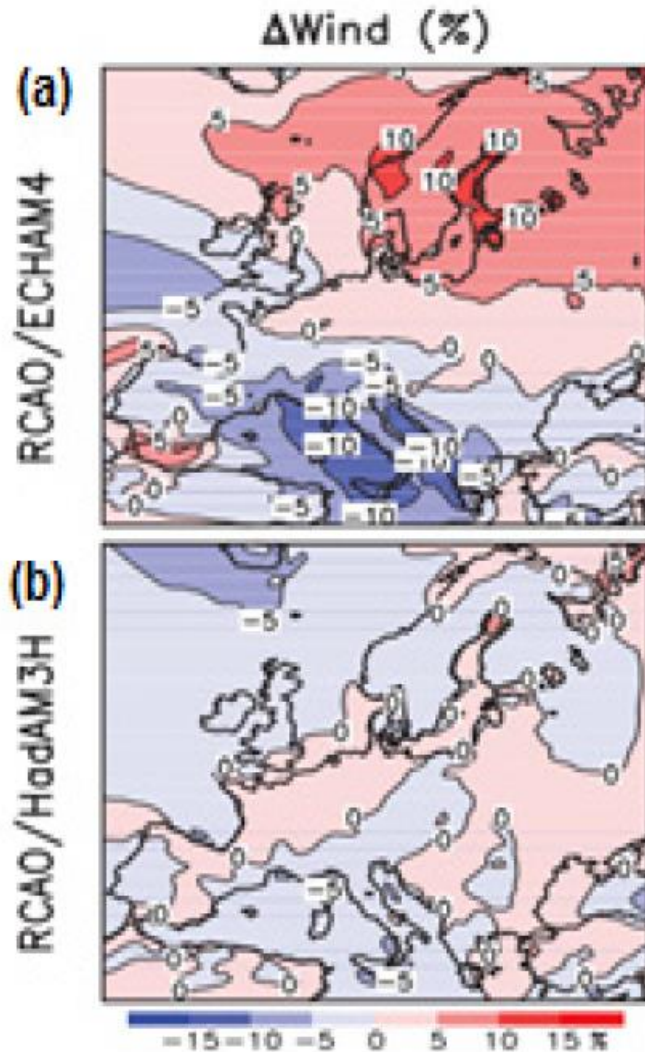
Σχήμα 18:Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα

1.5.2 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στην αιολική ενέργεια

Είναι ακόμα τεχνικά εφικτό να μην αφήσουμε την παγκόσμια θερμοκρασία να υπερβεί τους 2 °C, ωστόσο το σενάριο αυτό φαίνεται να αποκλείεται με την πάροδο του χρόνου. Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις της μεταβολής βασικών μετεωρολογικών παραγόντων στους τομείς της αιολικής ενέργειας; Για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα, είναι η χρήση υπολογιστικών εργαλείων που είναι ικανά να εκτιμήσουν σε βάθος χρόνου, τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα αιολικά χαρακτηριστικά των περιοχών που εγκαθίστανται αιολικά πάρκα.

Με τη βοήθεια των κλιματικών μοντέλων οι κλιματικοί επιστήμονες διαμορφώνουν μελλοντικά σενάρια που περιγράφουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο περιβάλλον. Προσομοιώσεις στη Βόρεια Ευρώπη δείχνουν για τις επόμενες δεκαετίες εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων και αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Άλλες κλιματικές προσομοιώσεις προβλέπουν μείωση της ταχύτητας του ανέμου στη νότια Ευρώπη και διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας σε πολλές περιοχές με συνέπεια τις μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου (Pryor et al., 2006).

Η προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας στη βόρεια Ευρώπη συνδυάστηκε επίσης με τη πρόβλεψη για ταχύτητες του ανέμου που ξεπερνούν τα συνηθισμένα όρια (Pryor et al., 2006). Οι υψηλές αυτές ταχύτητες μπορεί να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην λειτουργική περίοδο μιας ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και ισχυρών ανέμων οι ταχύτητες ανέμου επηρεάζουν άμεσα την ακεραιότητα του στροβίλου, προκαλώντας σημαντικές επιπτώσεις και οικονομικές απώλειες, ιδίως στις μικρές αιολικές μονάδες.



Σχήμα 19: Προσομοιώσεις που παρουσιάζουν αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα, μεταξύ των χρονικών περιόδων 1961-1990 και 2071-2100, υπό το SRES A2 σενάριο. Πηγή: Christensen et al.

Οι χώρες του Ηνωμένου Βασιλείου και η Ιρλανδία φαίνεται να μην παρουσιάζουν έντονες αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **Cradden**, μικρές αλλαγές της τάξης του $\pm 5\%$ φαίνεται να εμφανίζει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου για τη χρονική περίοδο 2081-2100. Η ταχύτητα και η ισχύς του ανέμου προβλέπεται να είναι σημαντικά πιο υψηλή τη χειμερινή περίοδο απ' ό,τι τη θερινή. Στη βορειοδυτική περιοχή της Γαλλίας αναμένεται αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου περισσότερες από 2, 6%, ενώ στη Μεσόγειο προβλέπεται μείωση έως και 5, 8% για τη χρονική περίοδο 2046-2065 (Najac et al., 2011). Επίσης Οι ταχύτητες ανέμου για το 2071-2100 παρουσιάζουν μια γενική αύξηση στην επιφάνεια της γης και μείωση στην επιφάνεια της θάλασσας, με εξαίρεση την αισθητή αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στο Αιγαίο πέλαγος (Bloom et al. 2008). Ωστόσο οι αβεβαιότητες των κλιματικών μοντέλων μπορεί να είναι μεγάλες και να μην δίνουν ικανοποιητικές προσεγγιστικές ερμηνείες για τις πιθανές μεταβολές του αιολικού κλίματος στο μέλλον. Έτσι οι επιστήμονες για να περιορίσουν αυτές τις αβεβαιότητες, διαμόρφωσαν μια σύζευξη κλιματικών μοντέλων που λαμβάνουν περισσότερες πληροφορίες για την περιοχή που εξετάζεται με αποτέλεσμα να εξάγονται πιο ασφαλή συμπεράσματα. Σε μια πρόσφατη έρευνα (Pryor et al., 2006), πάνω από δέκα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για να μελετήσουν κλιματικές μεταβολές για περιοχές της Σκανδιναβίας.

Τέλος οι αλλαγές στην παραγωγή ενέργειας που προκαλούνται από τις αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου θα έχουν αναμφισβήτητα επιπτώσεις στα έσοδα που κερδίζονται, ιδίως όταν οι αλλαγές συμπίπτουν με περιόδους υψηλών τιμών ενέργειας, παραδοσιακά κατά τη διάρκεια του χειμώνα στην Ελλάδα. Παρά το χαμηλό μεταβλητό κόστος, οι δυσμενείς μεταβολές στα έσοδα ενέχουν δυνητικό κίνδυνο για την ικανότητα της αιολικής εγκατάστασης να εξυπηρετεί το σχετικά υψηλό της κεφάλαιο το χρέος και θα επηρεάσει σαφώς την επενδυτική επίδοση των συστημάτων. Τα οικονομικά έσοδα των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων έχουν αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν μια ευαισθησία στις μέσες ταχύτητες ανέμου (Harrison και Wallace, 2005).

Κεφάλαιο 2. Τα μοντέλα NASA GISS ModelE και WRF

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα μοντέλα, τα οποία αποτελούν τα μοναδικά εργαλεία που έχει μέχρι σήμερα η επιστημονική κοινότητα στα χέρια της για την εκτίμηση των κλιματικών μεταβολών. Γίνεται αναφορά στους βασικούς τύπους κλιματικών μοντέλων και στους τρόπους πως καθίσταται εφικτή η χρήση των αποτελεσμάτων ενός παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου σε περιοχή μικρής χωρικής κλίμακας χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία δυναμικής μείωσης (ή δυναμικού υποβιβασμού) κλίμακας. Επίσης στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS GCM ModelE και το μετεωρολογικού μοντέλου μέσης κλίμακας WRF-ARW.

2.1 Κλιματικά μοντέλα

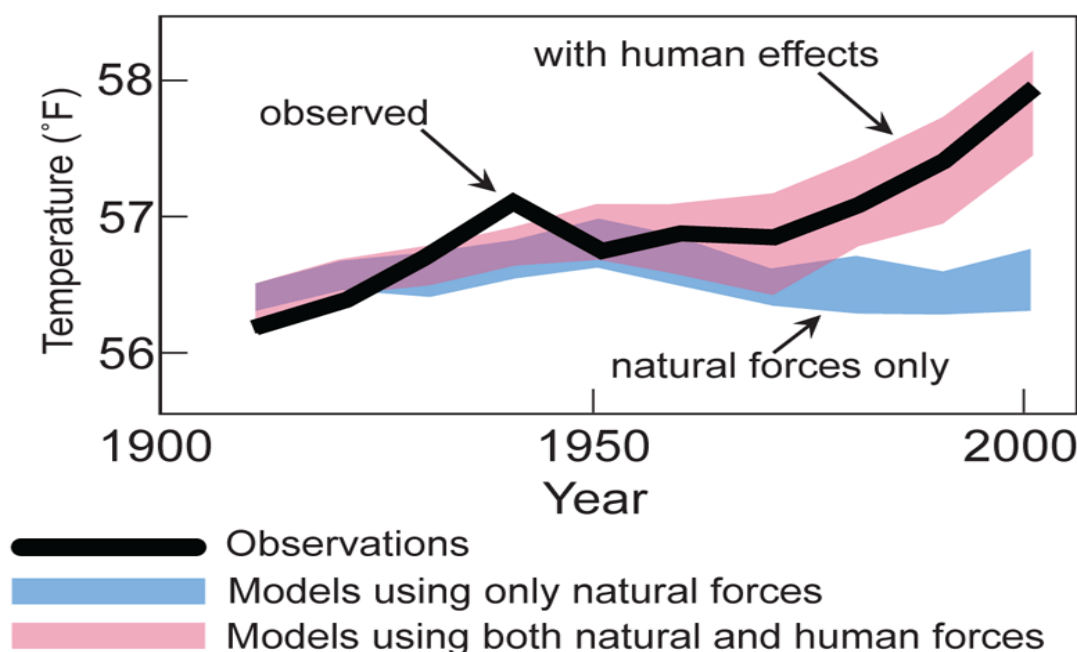
Τα κλιματικά μοντέλα είναι υπολογιστικά προγράμματα που προσομοιώνουν διεργασίες που διέπουν το παγκόσμιο κλίμα λόγω της φυσικής μεταβλητότητας στο πέρασμα των χρόνων, της ανθρώπινης παρέμβασης στο περιβάλλον, της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων βασικών αιτιών που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή. Αντικειμενικός σκοπός των κλιματικών μοντέλων είναι η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή και η προσομοίωση τους ως βασικές μεταβλητές για την πρόβλεψη των επιπτώσεων τους στο παγκόσμιο κλίμα. Σε γενικές γραμμές ένα κλιματικό μοντέλο προσομοιώνει τους παράγοντες που διαμορφώνει το παγκόσμιο κλίμα, λαμβάνοντας υπόψη φυσικές, βιολογικές και χημικές διεργασίες.

2.1.1 Εφαρμογές των κλιματικών μοντέλων

Τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται από τους επιστήμονες για να απαντήσουν σε πολλά διαφορετικά ερωτήματα, μεταξύ των οποίων και το γιατί το κλίμα της Γης αλλάζει και πώς μπορεί να αλλάξει στο μέλλον εάν συνεχιστούν με του σημερινούς ρυθμούς οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα τα κλιματικά μοντέλα ή διαφορετικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, περιγράφουν μελλοντικά σενάρια που ερμηνεύουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους τομείς της γεωργίας, κτηνοτροφίας, ενέργειας και άλλων πολλών οικονομικών τομών. Τα τελευταία τριάντα χρόνια τα κλιματικά μοντέλα εξελίσσονται σημαντικά με σκοπό την ανάπτυξη μελλοντικών σεναρίων για περιοχές που η οικονομική βιωσιμότητα τους, πρόκειται να επηρεαστεί σημαντικά από την κλιματική αλλαγή. Έτσι λοιπόν έχουν σχεδιαστεί κλιματικές εφαρμογές που λαμβάνουν ως μεταβλητές προσομοίωσης τους παράγοντες που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή με χρονική κλίμακα από μια δεκαετία ως ολόκληρο αιώνα. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές προσομοιώνουν το κλίμα του παρελθόντος, του παρόντος και του μέλλοντος. Πολλές φορές οι επιστήμονες για να βγάλουν πιο ασφαλή συμπεράσματα για το μέλλον, διαμορφώνουν μια σύζευξη κλιματικών μοντέλων τα οποία συγκρίνονται με τα κλιματικά μοντέλα για να παρατηρηθεί η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των μελλοντικών σεναρίων.

Τα κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν κλιματικές διεργασίες. Χρησιμοποιούν ευρύ φάσμα παραμετροποιήσεων για τους εκάστοτε παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα, συμπεριλαμβανομένων των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου CO₂, CH₄ και N₂O αλλά και άλλων ρύπων, μεταβολές στην ηλιακή κατάσταση, αερολύματα από ηφαιστειακές εκρήξεις, αερολύματα από ανθρώπινη δραστηριότητα, αλλαγές στη χρήση γης κλπ. Ωστόσο αυτές οι προσομοιώσεις δεν θεωρούνται πλήρως αντιπροσωπευτικές των καταγεγραμμένων παρατηρήσεων αλλά εξαρτώνται κυρίως από τη φυσική υπόσταση του μοντέλου. Αυτό καθιστά εφικτό στους επιστήμονες να συγκρίνουν τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών με τις πραγματικές τιμές των παρατηρήσεων που αφορούν συγκεκριμένη χρονική στιγμή του παρελθόντος, με σκοπό να εκτιμηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Αν λοιπόν τα κλιματικά μοντέλα ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στη κλιματική μεταβλητότητα του παρελθόντος

χρησιμοποιούνται από τους επιστήμονες ως αξιόπιστα μοντέλα για την εκτίμηση μελλοντικών σεναρίων. Οι ιστορικές διαδρομές είναι επίσης χρήσιμες για τον προσδιορισμό του μεγάλου ρόλου που παίζει η ανθρώπινη δραστηριότητα στην αλλαγή του κλίματος. Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει δύο παραλλαγές μοντέλου, το ένα με το παρατηρούμενο κλίμα λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις φυσικές δυνάμεις (μπλε σκίαση), ενώ το δεύτερο (ροζ σκίαση) λαμβάνει υπόψη τόσο τις φυσικές δυνάμεις όσο και την ανθρώπινη δραστηριότητα στο περιβάλλον.



Σχήμα 20: Σύγκριση παραλλαγών μοντέλου Πηγή: IPCC, 2014

Τα μοντέλα που προσομοιώνουν μόνο τη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος όπως οι μεταβολές στην επιφάνεια του ηλίου, οι εκπομπές αερίων από τα ηφαίστεια κ.α, δε λαμβάνουν υπόψη την ανθρώπινη δραστηριότητα στο περιβάλλον και συνεπώς την αλόγιστη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.

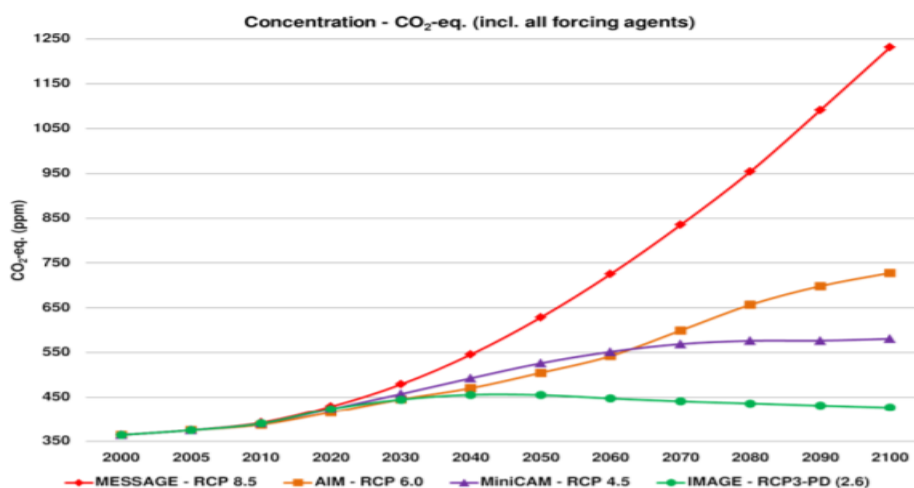
2.1.2 Κλιματικά σενάρια.

Είναι απαραίτητο προτού χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο παγκόσμια κλίμακας, να ληφθεί ως υπόθεση ένα κλιματικό σενάριο που αφορά το ρυθμό που το κλίμα μεταβάλλεται στην πάροδο του χρόνου. Τα κλιματικά σενάρια είναι συνολικά τέσσερα και ονομάζονται RCP (Representative Concentration Pathways). Στα υποθετικά αυτά σενάρια δεν λαμβάνονται υπόψη φυσικές μεταβολές, όπως η μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας, ή μη αναμενόμενες φυσικές εκπομπές όπως η έκρηξη ενός ηφαιστείου. (Βάσκου, 2015).

Η πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (IPCC, 2014) επικεντρώθηκε σε τέσσερα μελλοντικά σενάρια θέρμανσης, γνωστά ως σενάρια αντιπροσωπευτικών διαδρομών συγκέντρωσης (RCP). Αυτές εξετάζουν πώς το κλίμα μπορεί να αλλάξει από το παρόν μέχρι το 2100 και μετά.

Πολλοί παράγοντες που πρόκειται να αυξήσουν τις μελλοντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, όπως ο πληθυσμός και η οικονομική ανάπτυξη, είναι δύσκολο να προβλεφθούν. Τα σενάρια αυτά είναι το **RCP2.6**, το **RCP4.5**, το **RCP6** και το **RCP8.5**. Σύμφωνα με το σενάριο RCP2.6 εκτιμάται πως μια σημαντική αύξηση στην εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου την δεκαετία 2010-2020 η οποία θα συνεχιστεί σταδιακά και τις επόμενες δεκαετίες. Για το σενάριο RCP4.5 θεωρείται πως η μείωση των ρύπων θα γίνει το 2040, για το RCP6 το 2060 και τέλος το RCP8.5 που αποτελεί το χειρότερο σενάριο κλιματικής αλλαγής

εκτιμάται πως η αύξηση θα παρουσιαστεί καθ' όλη τη διάρκεια του 21ου αιώνα. Αυτά τα σενάρια RCP καθορίζουν διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας. Τα μοντέλα χρησιμοποιούν αυτές τις δυνάμεις για να εξετάσουν πώς θα αλλάξει το κλιματικό σύστημα της Γης υπό την εφαρμογή κάθε σεναρίου ξεχωριστά. Τα ονόματα των επιμέρους πειραμάτων (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, και RCP8.5) καθορίστηκαν από την πιθανή μεταβολή στην επιβαλλόμενη ακτινοβολία (radiative forcing) με τιμές αναφοράς τις τιμές του έτους 2100, σε σύγκριση με αυτές της προ-βιομηχανικής περιόδου (+2.6, +4.5, +6.0 και +8.5 W/m² αντίστοιχα) (Βάσκου, 2015).



Σχήμα 21: Πιθανές μεταβολές στη συγκέντρωση του CO₂, (Βάσκου, 2015)

2.1.3 Μαθηματική διαμόρφωση των κλιματικών μοντέλων

Τα κλιματικά μοντέλα βασίζονται σε καλά τεκμηριωμένες φυσικές διαδικασίες για την προσομοίωση της μεταφοράς ενέργειας και υλικών μέσω του κλιματικού συστήματος. Τα κλιματικά μοντέλα, γνωστά και ως γενικά μοντέλα κυκλοφορίας ή GCMs, χρησιμοποιούν μαθηματικές εξισώσεις για να χαρακτηρίσουν το πώς αλληλεπιδρούν η ενέργεια και η ύλη σε διάφορα μέρη του ωκεανού, της ατμόσφαιρας, της γης. Η οικοδόμηση και η λειτουργία ενός κλιματικού μοντέλου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία ταυτοποίησης και ποσοτικοποίησης των διαδικασιών του γήινου συστήματος, η εκπροσώπησή τους με μαθηματικές εξισώσεις, ο καθορισμός μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν τις αρχικές συνθήκες και τις επακόλουθες μεταβολές στην ανάκαμψη του κλίματος και την επανειλημμένη επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιώντας ισχυρούς υπερυπολογιστές.

Η πρόγνωση του καιρού, η κατανόηση του κλίματος και η διαμόρφωση μελλοντικών σεναρίων που περιγράφουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, στηρίζεται στις εξισώσεις Navier Stokes που αποτελούν το μαθηματικό υπόβαθρο των κλιματικών μοντέλων. Οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζονται σε μια περιστρεφόμενη σφαίρα λαμβάνοντας ως μεταβλητή εξέτασης διάφορες πηγές ενέργειας όπως η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία εδάφους κ.α.

Πιο συγκεκριμένα οι εξισώσεις που χρησιμοποιούν τα κλιματικά μοντέλα μπορούν να καλύψουν την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς, τη ξηρά και τις περιοχές που καλύπτονται από χιόνι. Τα κλιματικά μοντέλα είναι απαραίτητα να συμμορφώνονται με θεμελιώδεις αρχές όπως ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος ο οποίος δηλώνει ότι η ενέργεια σε ένα κλειστό σύστημα δεν μπορεί να αλλοιωθεί αλλά ούτε και να αυξηθεί.

Ο νόμος του Stefan **Boltzman** αποτελεί ένα άλλο σημαντικό μαθηματικό υπόβαθρο των κλιματικών μοντέλων καθώς επιστήμονες τον έχουν χρησιμοποιήσει για να δείξουν ότι η επιφάνεια της Γης, είναι θερμότερη κατά 33 °C από ότι θα ήταν χωρίς την ύπαρξη του.

Στη συνέχεια, υπάρχουν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του τι συμβαίνει στο κλιματικό σύστημα, όπως η εξίσωση **Clausius-Clapeyron**, η οποία χαρακτηρίζει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της μέγιστης πίεσης υδρατμών.

Ωστόσο οι πιο σημαντικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα κλιματικά μοντέλα είναι οι εξισώσεις **Navier - Stokes** οι οποίες καταγράφουν την ταχύτητα, την πίεση, τη θερμοκρασία και την πυκνότητα των αερίων στην ατμόσφαιρα και το νερό στον ωκεανό.

Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι αυτό το σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων είναι τόσο περίπλοκο που δεν υπάρχει καμία γνωστή ακριβής λύση σε αυτές (εκτός από μερικές απλές περιπτώσεις). Αντ'αυτού, οι εξισώσεις αυτές επιλύονται "αριθμητικά" στο μοντέλο, πράγμα που σημαίνει ότι είναι προσεγγιστικές.

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

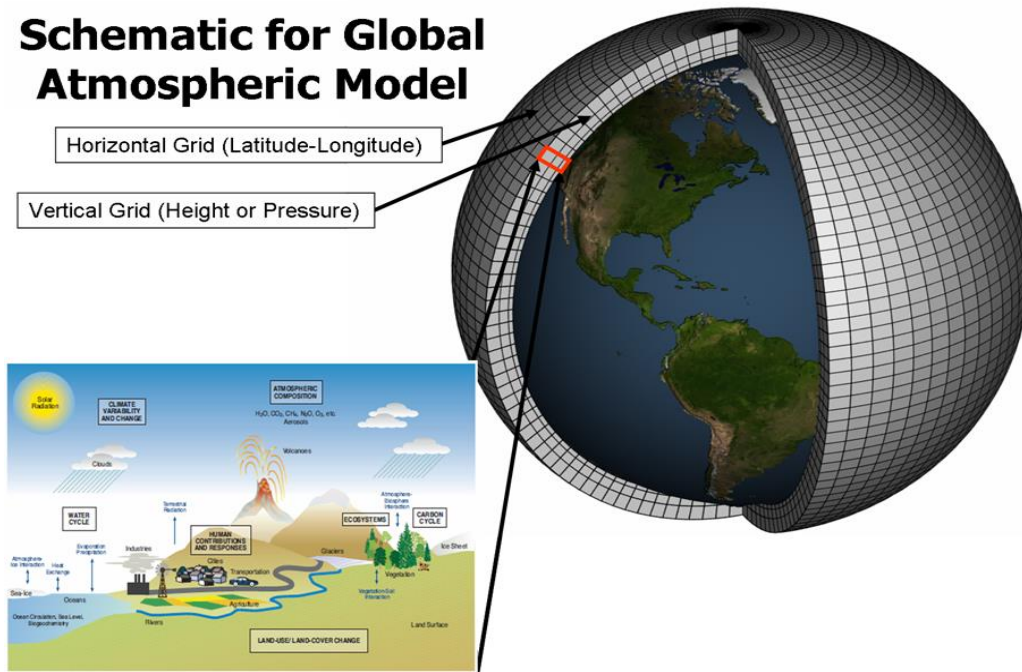
Σχήμα 22: Οι εξισώσεις Navier-Stokes για την "ασυμπίεστη" ροή σε τρεις διαστάσεις (x, y και z). (Αν και ο αέρας στην ατμόσφαιρά μας είναι τεχνικά συμπεσμένος, η κίνηση του αέρα είναι σχετικά αργή και επομένως αντιμετωπίζεται ως ασυμπίεστη για να απλοποιήσει τις εξισώσεις. Πηγή: <https://www.carbonbrief.org/>

2.1.4 Χωρική-Χρονική ανάλυση κλιματικού μοντέλου

Το προφανές ερώτημα που δημιουργείται είναι πώς το κλιματικό μοντέλο υπολογίζει όλες αυτές τις εξισώσεις για κάθε περιοχή που εκτελεί μια προσομοίωση. Λόγω της πολυπλοκότητας του κλιματικού συστήματος και του περιορισμού της υπολογιστικής ισχύος, ένα μοντέλο δεν μπορεί να υπολογίσει όλες αυτές τις διαδικασίες για κάθε κυβικό μέτρο του κλιματικού συστήματος. Αντίθετα, ένα κλιματικό μοντέλο χωρίζει τη Γη σε μια σειρά κουτιών ή "κυψελών". Ένα παγκόσμιο μοντέλο μπορεί να έχει δεκάδες στρώματα σε όλο το ύψος και το βάθος της ατμόσφαιρας και των ωκεανών.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει μια τρισδιάστατη αναπαράσταση της προσομοίωσης που εκτελεί έχοντας κάνει τη χωρική διακριτοποίηση σε χωρικά κελιά. Στη συνέχεια, το μοντέλο υπολογίζει την κατάσταση του κλιματικού συστήματος σε κάθε κελί, υπολογίζοντας τη θερμοκρασία, την πίεση του αέρα, την υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου.

Schematic for Global Atmospheric Model

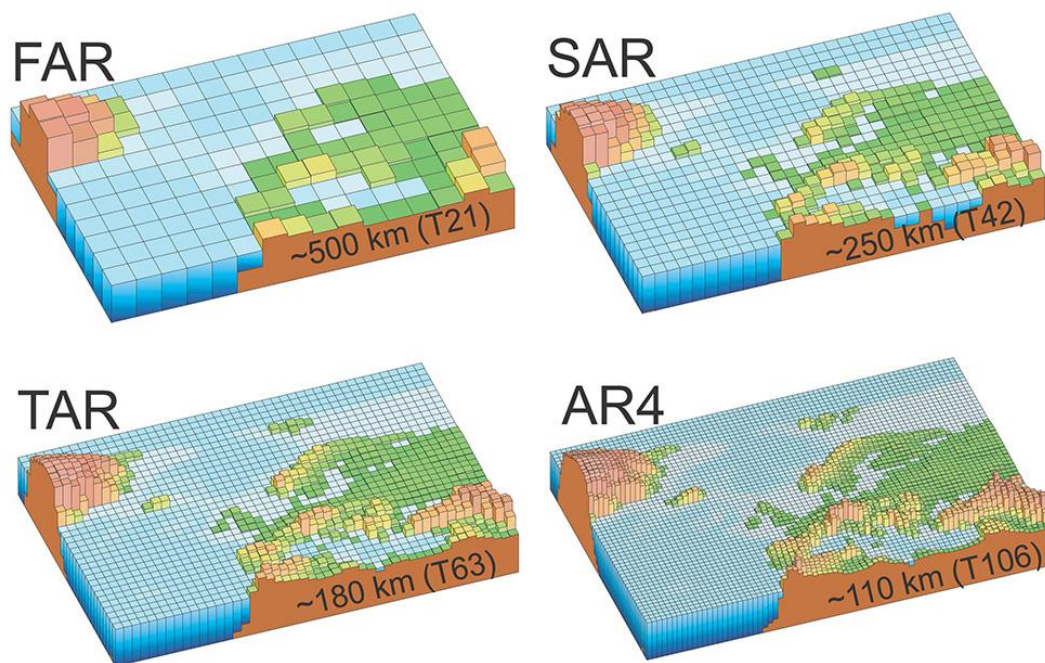


Σχήμα 23 :Εικόνα των κυψελίδων πλέγματος που χρησιμοποιούνται από τα κλιματικά μοντέλα και τις κλιματολογικές διεργασίες που υπολογίζει το μοντέλο για κάθε κελί (κάτω γωνία). Πηγή: NOAA GFDL

Το μέγεθος των κυψελίδων δικτύου σε ένα μοντέλο είναι γνωστό ως "χωρική ανάλυση" του. Ένα σχετικά τυπικό παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο έχει συνήθως κυψελίδες που είναι περίπου 100 χιλιόμετρα γεωγραφικού μήκους και γεωγραφικού πλάτους. Επειδή η Γη είναι σφαίρα, τα κελιά για ένα πλέγμα με βάση το μήκος και το πλάτος είναι μεγαλύτερα στον ισημερινό και μικρότερα στους πόλους.

Ένα μοντέλο υψηλής ανάλυσης θα έχει περισσότερα, μικρότερα κουτιά. Όσο υψηλότερη είναι η ανάλυση, τόσο πιο συγκεκριμένες είναι οι πληροφορίες για το κλίμα που μπορεί να παράγει ένα μοντέλο για μια συγκεκριμένη περιοχή - αλλά αυτό συμβαίνει με το κόστος που απαιτείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επειδή το μοντέλο έχει περισσότερους υπολογισμούς.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει πώς βελτιώθηκε η χωρική ανάλυση των μοντέλων μεταξύ της πρώτης και της τέταρτης έκθεσης αξιολόγησης της IPCC. Μπορείτε να δείτε πώς εμφανίζεται η λεπτομέρεια στην τοπογραφία της επιφάνειας της γης καθώς βελτιώνεται η ανάλυση.



Σχήμα 24: Αύξηση της χωρικής ανάλυσης των κλιματικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν μέσω των πρώτων τεσσάρων εκθέσεων αξιολόγησης της IPCC: πρώτη ("FAR") που δημοσιεύθηκε το 1990, δεύτερη ("SAR") το 1995, τρίτη (TAR) το 2001 και τέταρτη (AR4) 2007. Source: IPCC, 2014

Γενικά, η αύξηση της χωρικής ανάλυσης ενός μοντέλου απαιτεί αύξηση υπολογιστικής ισχύος. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τον υποβιβασμό κλίμακας που περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.

Ένας παρόμοιος συμβιβασμός πρέπει να γίνει για το "χρονικό βήμα" για το πόσο συχνά ένα μοντέλο υπολογίζει την κατάσταση του κλιματικού συστήματος. Όπως και με το μέγεθος των χωρικών κελιών, έτσι και με το χρονικό βήμα όσο μειώνεται το μοντέλο γίνεται πιο ακριβές αλλά έχει περισσότερους υπολογισμούς να κάνει.

Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της κατάστασης του κλιματικού συστήματος για κάθε λεπτό ενός ολόκληρου αιώνα θα απαιτούσε πάνω από 50 εκατομμύρια υπολογισμούς για κάθε κυψελίδα - ενώ μόνο ο υπολογισμός του για κάθε ημέρα θα χρειαζόταν 36.500 μετρήσεις. Αυτό είναι ένα αρκετά μεγάλο εύρος που θέτει το ερώτημα στους επιστήμονες για την καταλληλότητα του χρονικού βήματος που πρέπει να επιλέξουν στην προσομοίωση του κλιματικού μοντέλου που χρησιμοποιούν.

Μαθηματικά, όπως αναφέρει ο Williams: “η σωστή προσέγγιση που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες είναι η μείωση του χρονικού βήματος έως ότου οι προσομοιώσεις συγκλίνουν και τα αποτελέσματα σταματούν να αλλάζουν. Ωστόσο, κανονικά δεν υπάρχουν οι υπολογιστικοί πόροι για να τρέξουμε τα μοντέλα με ένα μικρό χρονικό βήμα. Ως εκ τούτου, είμαστε αναγκασμένοι να ανεχθούμε ένα μεγαλύτερο χρονικό βήμα από ό, τι θα θέλαμε ιδανικά”. Για παράδειγμα για την ατμοσφαιρική συνιστώσα των κλιματικών μοντέλων, ένα χρονικό βήμα περίπου 30 λεπτών (carbonbrief.org).

Η διακριτική ικανότητα περιορίζει την αποτελεσματικότητα των ΜΓΚ, ιδιαίτερα στους τομείς της γεωργίας, όπου η πληροφορία πρέπει να είναι ακριβής. Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας είναι επιστημονικά πολύπλοκα μοντέλα και έχουν υψηλό κόστος ανάπτυξης. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιούνται σε μικρό αριθμό ερευνητικών κέντρων. Τα τρία κέντρα από αυτά εδράζονται στις ΗΠΑ, τα δύο σε Γαλλία, Ιαπωνία και Αυστραλία, και από ένα στο Ηνωμένο Βασίλειο, τον

Καναδά, τη Γερμανία και την Κίνα. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα πιο διαδεδομένα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας.

Πίνακας 2: Λίστα (GCMs), (Πηγή: Διαλέζος, 2015)

A/A	Τίτλος	Πηγή	Αναφορά
1.	GSIRO2	Αυστραλία	IPCC 2006
2.	CGCM2	Καναδάς	PCMDI 2006
3.	ECHAMS	Γερμανία	WDC 2008
4.	HadCM3	Ηνωμένο Βασίλειο	
5.	CCSM	ΗΠΑ	
6.	ARPECE	Γαλλία	
7.	MAM	Καναδάς	
8.	GEOS-2	ΗΠΑ (NASA)	
9.	GISS	ΗΠΑ (NASA)	
10.	CCM2	NOAA	

2.1.5 Τύποι κλιματικών μοντέλων

Τα πρώτα και βασικότερα αριθμητικά μοντέλα κλιματικών μοντέλων είναι τα **Μοντέλα ενεργειακού ισοζυγίου (EBMs)**. Τα EBM δεν προσομοιώνουν το κλίμα, αλλά εξετάζουν την ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα από τον ήλιο και της θερμότητας που απελευθερώνεται πίσω στο διάστημα. Η μόνη μεταβλητή κλίματος που υπολογίζουν είναι η θερμοκρασία επιφανείας. Τα πιο απλά μοντέλα τέτοιου τύπου συνήθως είναι μίας διάστασης και απαιτούν μόνο λίγες γραμμές κώδικα και μπορούν να τρέξουν σε ένα υπολογιστικό φύλλο.

Ένα βήμα από τα EBMs είναι τα **κυκλοφοριακά μοντέλα ακτινοβολίας**, τα οποία προσομοιώνουν τη μεταφορά ενέργειας μέσω του ύψους της ατμόσφαιρας - για παράδειγμα, με τη μετακίνηση καθώς ο θερμός αέρας ανεβαίνει. Τα κυκλοφορικά μοντέλα ακτινοβολίας μπορούν να υπολογίσουν τη θερμοκρασία και την υγρασία διαφόρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Αυτά τα μοντέλα είναι συνήθως μίας διάστασης – λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη μεταφορά ενέργειας μέσω της ατμόσφαιρας - αλλά μπορούν επίσης να είναι και δυδιάστατα.

Το επόμενο επίπεδο είναι τα **μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (Global Circulation Models - GCMs)**, που ονομάζονται επίσης παγκόσμια κλιματικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν τη φυσική υπόσταση του ίδιου του κλίματος. Αυτό σημαίνει ότι εξετάζουν τις ροές αέρα και νερού στην ατμόσφαιρα ή / και τους ωκεανούς, καθώς και τη μεταφορά θερμότητας.

Υπάρχουν επίσης περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (RCMs) που εκτελούν παρόμοια δουλειά με τα GCM, αλλά για μια περιορισμένη περιοχή της Γης. Επειδή καλύπτουν μια μικρότερη περιοχή, τα RCM μπορούν γενικά να λειτουργούν πιο γρήγορα και σε υψηλότερη ανάλυση από τα GCM. Ένα μοντέλο με υψηλή ανάλυση έχει μικρότερα χωρικά κελιά και επομένως μπορεί να παράγει λεπτομερέστερες πληροφορίες για το κλίμα για μια συγκεκριμένη περιοχή.

Επίσης υπάρχουν τα **ωκεάνια μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (OGCMs)** που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση κλιματικών διεργασιών που υφίστανται στους ωκεανούς. Για την προσομοίωση διεργασιών που επιφέρει η κλιματική αλλαγή στην ατμόσφαιρα, χρησιμοποιούνται τα **ατμοσφαιρικά μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας (AGCMs)**. Τα συγκεκριμένα κλιματικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τη θερμοκρασία των ωκεανών και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του εδάφους. Ωστόσο κανένα από τα δύο κλιματικά μοντέλα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση μελλοντικών

σεναρίων που αφορούν τις αλλαγές του παγκόσμιου κλίματος. Έτσι για την εκτίμηση αλλαγών του κλίματος γίνεται μια σύζευξη των δύο παραπάνω κλιματικών μοντέλων, δημιουργώντας τα **ατμοσφαιρικά-ωκεάνια γενικά μοντέλα κυκλοφορίας (AOGCMs)**.

Τέλος υπάρχουν μοντέλα που προσομοιώνουν βιογεωχημικές διεργασίες, δηλαδή τη μεταφορά χημικών ουσιών από ζωντανούς οργανισμούς στο περιβάλλον και τον τρόπο αλληλεπίδρασης με το κλίμα. Τα μοντέλα αυτά καλούνται **Μοντέλα ενδιάμεσης πολυπλοκότητας (Earth Models of Intermediate Complexity, EMICs)** και μπορούν να προσομοιώσουν τον κύκλο του άνθρακα, τον κύκλο του αζώτου, την ατμοσφαιρική χημεία, την οικολογία των ωκεανών και τις αλλαγές στη βλάστηση και τη χρήση της γης, οι οποίες επηρεάζουν την ανταπόκριση του κλίματος στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που προκαλούνται από τον άνθρωπο.

Ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα μοντέλα όλων των κατηγοριών μπορούν να παρέχουν σωστές και χρήσιμες πληροφορίες για το κλίμα, αρκεί να χρησιμοποιηθούν βάση λειτουργικότητας και σκοπιμότητας της έρευνας. Τέλος, η ασφαλέστερη μέθοδος για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, θεωρείται ότι είναι η σύγκριση αποτελεσμάτων από διαφορετικά μοντέλα, για την απόκτηση μιας πλήρους εικόνας ενός φαινομένου ή μιας διεργασίας.

2.2 Το κλιματικό μοντέλο NASA GISS ModelE

Το κλιματικό μοντέλο NASA GISS ModelE (Schmidt et al., 2006; Aleinov et al., 2006; Koch et al., 2006; Miller et al., 2006; Shindell et al., 2006) που χρησιμοποιείται στην μελέτη της παρούσας εργασίας, έχει ως στόχο τη σύζευξη μοντέλων ατμόσφαιρας και ωκεανού. Πρωταρχική έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της κλιματικής ευαισθησίας - σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο, συμπεριλαμβανομένης της ανταπόκρισης του κλιματικού συστήματος σε ποικίλους παράγοντες όπως η ηλιακή μεταβλητότητα, τα ηφαίστεια, οι ανθρωπογενείς και φυσικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αερολυμάτων κλπ.

Το κλιματικό μοντέλο NASA GISS ModelE, παρουσιάζεται στις εκθέσεις της διακυβερνητικής επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC) ως ένα σημαντικά αξιόπιστο μοντέλο που εκτελεί προσομοιώσεις για το παρελθόν, το μέλλον καθώς και προσομοιώσεις που αφορούν τα επόμενα τριακόσια χρόνια (IPCC, 2007; WGI, 2007).

2.2.1 Φιλοσοφία του μοντέλου

Σε κάθε κλιματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση κλιματικών διεργασιών λαμβάνονται υπόψη κάποιες βασικές παραδοχές που διαμορφώνουν τη φυσική υπόσταση του μοντέλου. Στο κλιματικό μοντέλο NASA GISS ModelE η επιφανειακή πίεση παραμένει σταθερή, που σημαίνει ότι οι υδρατμοί δεν αποτελεί παράγοντα που προσμετράται στην ατμοσφαιρική μάζα (Schmidt et al., 2006). Παράλληλα ο υπολογισμός της πίεσης δε λαμβάνει υπόψη τα ποσοστά υγρασίας των συμπυκνωμάτων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Επίσης η λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Οι βασικοί που χρησιμοποιούνται στην εκτέλεση των προσομοιώσεων από το κλιματικό μοντέλο είναι η δυνητική θερμοκρασία, ο λόγος ανάμειξης των υδρατμών, και οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας.

Τέλος κατά το μηχανισμό της μεταφοράς (advection) στην οριζόντια μεταφορά κάποιας ιδιότητας της ατμόσφαιρας ή του ωκεανού, όπως η θερμότητα, η υγρασία ή η αλατότητα, η μάζα της υγρασίας και των ιχνοστοιχείων διατηρείται σταθερή, ενώ η δυνητική ενθαλπία διατηρείται για την θερμότητα. Η κινητική ενέργεια μέσω διαφόρων διεργασιών ανάμειξης λαμβάνεται ως ποσότητα θερμότητας σε τοπικό επίπεδο. Σημαντική παραδοχή επίσης είναι ότι η καθαρή ροή της θερμότητας που εισέρχεται επιφάνεια του πλανήτη ισούται με την καθαρή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί χρονικό βήμα 30 λεπτών για όλους τους

υπολογισμούς που αφορούν φυσικές διεργασίες, ενώ για την δυναμική της ατμόσφαιρας το χρονικό βήμα είναι 225 δευτερόλεπτα. Ο κωδικός ακτινοβολίας εκτελείται κάθε πέντε χρονικά βήματα φυσικής (κάθε 2, 5 ώρες), ωστόσο, η γωνία ζενίθ ενημερώνεται για κάθε χρονικό βήμα.

2.2.2 Διαμόρφωση του μοντέλου

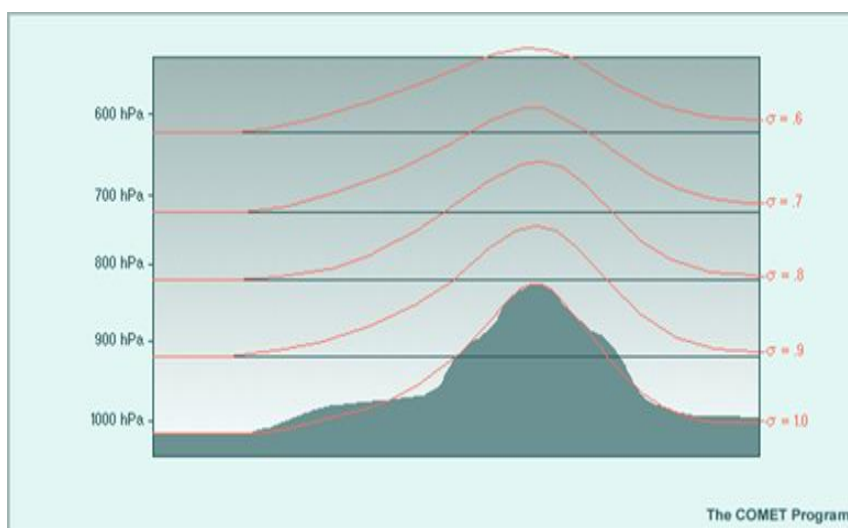
Το μοντέλο χρησιμοποιεί καρτεσιανές συντεταγμένες. Η απλούστερη μορφή των βασικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στα ατμοσφαιρικά αριθμητικά μοντέλα γράφεται σε συντεταγμένες πίεσης στην κατακόρυφη διεύθυνση. Όμως, αυτές οι συντεταγμένες όπως και οι ισοϋψείς δεν είναι πραγματικά χρήσιμες, επειδή τέμνουν τα βουνά και κατά συνέπεια δεν ορίζονται σε ορισμένα τμήματα της περιοχής ολοκλήρωσης. Έτσι, ο Phillips (1957) ανέπτυξε την σίγμα (σ) συντεταγμένη (Σχήμα 24) η οποία ορίζεται σε όλη τη περιοχή ολοκλήρωσης και παραλλαγές της χρησιμοποιούνται από ένα μεγάλο αριθμό ατμοσφαιρικών αριθμητικών μοντέλων εκ των οποίων είναι και το NASA GISS ModelE το οποίο χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο τύπο συντεταγμένων στην κατακόρυφη διακριτοποίηση ως και τα 150 hpa.

Στην απλούστερή της μορφή, η συντεταγμένη σίγμα ορίζεται ως:

$$\sigma = \frac{p}{p_s}$$

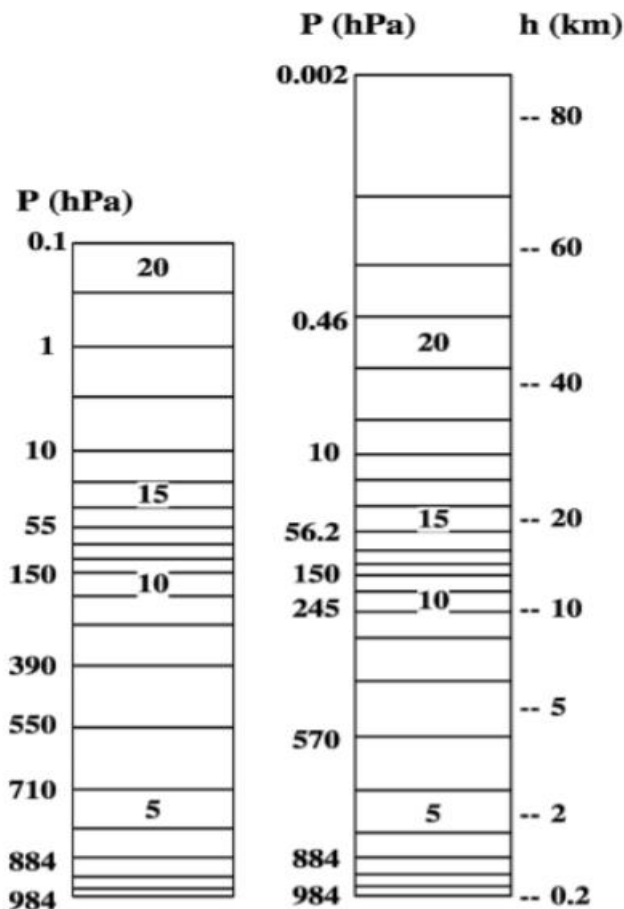
p είναι η πίεση στο συγκεκριμένο επίπεδο του μοντέλου και στο συγκεκριμένο σημείο πλέγματος,

p_s είναι η πίεση στην επιφάνεια της γης (και όχι στη μέση στάθμη της θάλασσας) στο συγκεκριμένο σημείο πλέγματος



Σχήμα 23: Σχηματική απεικόνιση των συντεταγμένων σίγμα στα κατακόρυφα επίπεδα πίεσης

Η διακριτοποίηση που γίνεται σε κατακόρυφο επίπεδο χρησιμοποιεί σίγμα συντεταγμένες μέχρι τα 150 hpa, με τα στρώματα πίεσης από αυτό το σημείο και πάνω να παραμένουν σταθερά. Τα επίπεδα κατακόρυφης διακριτοποίησης είναι σαράντα, φτάνοντας μέχρι και τα 0, 1 hpa.



Σχήμα 24: Απεικόνιση της κατακόρυφης διαμόρφωσης του μοντέλου 40 στρωμάτων. (Schmidt et al., 2006)

Η χρονική ανάλυση του κλιματικού μοντέλου NASA GISS ModelE είναι τριάντα λεπτά για προσομοιώσεις φυσικών διεργασιών ενώ για τη δυναμική της ατμόσφαιρας το χρονικό βήμα είναι 225 δευτερόλεπτα (Shindell et al., 2006).

2.2.3 Μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF

Το περιοχικό μοντέλο WRF (Weather Research and Forecasting), είναι ένα υδροστατικό μοντέλο μέσης κλίμακας που χρησιμοποιείται για την πρόγνωση του καιρού και την προσομοίωση κλιματικών διεργασιών σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Το σύστημα διαθέτει δύο δυναμικούς πυρήνες με τον πρώτο να αφομοιώνει τα κλιματικά δεδομένα που εξετάζονται και τον δεύτερο να εκτελεί παράλληλους υπολογισμούς μέσω του λογισμικού που έχει διαμορφωθεί για την επεξεργασία των κλιματικών δεδομένων. Η χωρική ανάλυση του WRF καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διακριτοποίησης των περιοχών που εξετάζονται που μπορεί να είναι από δεκάδες μέτρα ή χιλιάδες χιλιόμετρα. Αυτό σημαίνει το WRF, είναι ικανό να πετύχει έναν ικανοποιητικό υποβιβασμό της κλίμακας που θα μας δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Το WRF έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πραγματικές μετρήσεις από ιστορικά δεδομένα και να τις λάβει υπόψη του στη διαμόρφωση μελλοντικών σεναρίων που προκύπτουν από την προσομοίωση του κλιματικού μοντέλου για συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Οι προσομοιώσεις αυτές χάρη στην υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα του WRF μπορούν να αναλυθούν στατιστικά και να εξάγουν συμπεράσματα για τον τρόπο που θα επηρεάσουν οι κλιματικές αλλαγές την οικονομική βιωσιμότητα πολλών αγροτικών περιοχών. Το WRF έχει

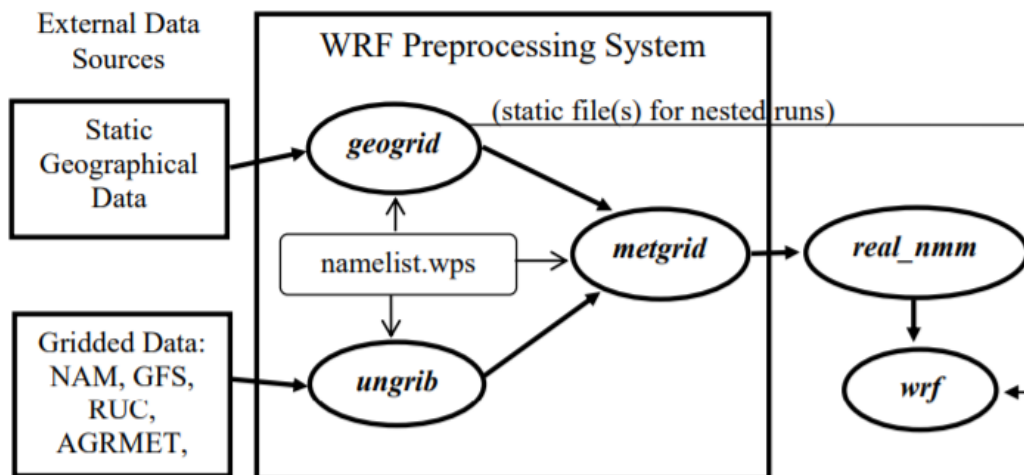
δύο δυναμικούς πυρήνες: Τον Advanced Research WRF (ARW) και τον Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM). Οι δυναμικοί πυρήνες περιλαμβάνουν κυρίως την οριζόντια μεταφορά, την βαροβαθμίδα, την δύναμη Coriolis, την άνωση, την διάχυση και τα βήματα ολοκλήρωσης των εξισώσεων. Και οι δύο πυρήνες είναι Eulerian με κατακόρυφες συντεταγμένες που ακολουθούν την ορογραφία. Η ανάπτυξη του ARW γίνεται κυρίως στο NCAR/MMM (Mesoscale & Microscale Meteorology) ενώ η ανάπτυξη του NMM πραγματοποιείται από το NCEP/EMC (Environmental Modeling Center) και υποστήριξη παρέχεται από το NCAR/DTC (Developmental Testbed Center). (ucar.edu “*WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL*”)

Το σύστημα προεπεξεργασίας του WRF (WRF Preprocessing System aka WPS), είναι ένα σύνολο τριών προγραμμάτων που έχουν ως σκοπό την αριθμητική πρόγνωση του καιρού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της παρεμβολής. Τα προγράμματα αυτά είναι το **metgrid**, το **geogrid** και το **ungrib**.

Το geogrid παρέχει πληροφορίες για τη διαμόρφωση του χάρτη των περιοχών που εξετάζονται λαμβάνοντας υπόψη γεωγραφικά αλλά και κλιματικά χαρακτηριστικά όπως το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το υψόμετρο της περιοχής, ετήσια μέση θερμοκρασία κτλπ. Το πρόγραμμα ungrib διαμορφώνει μετεωρολογικά πεδία από τα διαμορφωμένα αρχεία GRIB τα οποία είναι αρχεία που περιέχουν χρονικά μεταβαλλόμενα μετεωρολογικά πεδία. Έτσι λοιπόν το ungrib, διαβάζει αυτού του τύπου τα αρχεία και τα μετατρέπει σε μια πιο απλή μορφή, γνωστή και ως ενδιάμεση μορφή. Τα GRIB αρχεία συνήθως περιέχουν περισσότερα πεδία από ό, τι χρειάζονται για να προετοιμαστεί το WRF. Και οι δύο εκδόσεις της μορφής GRIB χρησιμοποιούν διάφορους κώδικες για να προσδιορίσουν τις μεταβλητές και τα επίπεδα στο αρχείο GRIB. Το **Ungrib** χρησιμοποιεί πίνακες Vtables (variables tables) των κωδικών αυτών, με σκοπό να καθορίσει ποια πεδία από αυτά πρέπει να εξάγονται από το αρχείο GRIB και να αποτυπώνονται στην ενδιάμεση μορφή. Τα Vtables για τα κοινά αρχεία GRIB παρέχονται με το λογισμικό ungrib. (ucar.edu ‘WRF Preprocessing System (WPS)’).

Το **metgrid** παρεμβάλει οριζόντια τα μετεωρολογικά πεδία που εξάγονται από το ungrib στα μοντέλα grids που ορίζονται από το geogrid. (ucar.edu ‘WRF Preprocessing System (WPS)’). Η κάθετη παρεμβολή των μετεωρολογικών πεδίων στα επίπεδα που επεξεργάζεται το WRF εκτελούνται στο πλαίσιο του πραγματικού προγράμματος. Η ροή δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων του WPS παρουσιάζεται στο σχήμα 27. Κάθε ένα από τα προγράμματα WPS αναγνωρίζει τις παραμέτρους από ένα κοινό αρχείο namelist, όπως φαίνεται στο σχήμα. Αν και δε φαίνεται στην εικόνα υπάρχουν πρόσθετα αρχεία πίνακα που χρησιμοποιούνται από μεμονωμένα προγράμματα. Οι πίνακες αυτοί παρέχουν διαδικασία επιπρόσθετου ελέγχου επί των εργασιών των προγραμμάτων, αν και γενικά δεν χρειάζεται να μεταβληθούν από το χρήστη. (ucar.edu ‘WRF Preprocessing System (WPS)’).

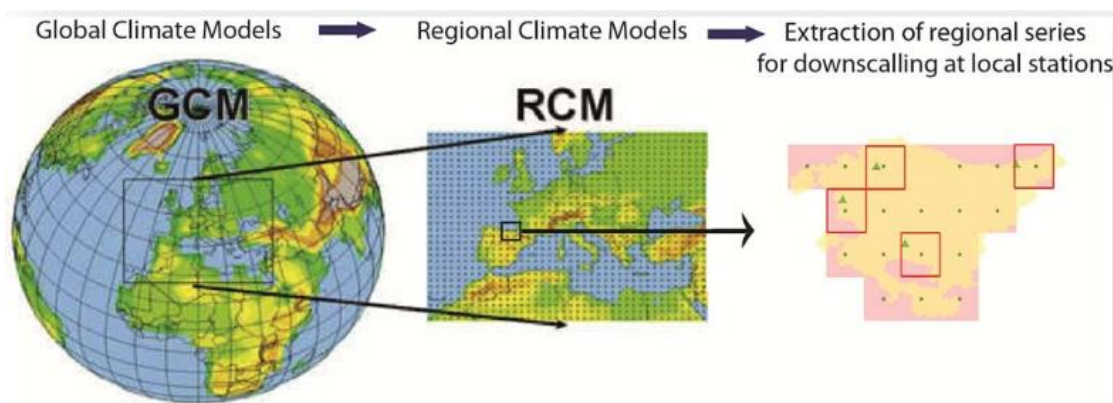
Ο μηχανισμός ανάπτυξης του WPS, παρουσιάζει πολλά κοινά στοιχεία στη λειτουργία του με τον μηχανισμό ανάπτυξης που χρησιμοποιείται από το μετεωρολογικό μοντέλο WRF το οποίο με τη σειρά του, δίνει τις απαραίτητες επιλογές για την εφαρμογή του WPS σε ποικίλο αριθμό πλατφόρμων. Τα προγράμματα metgrid και geogrid μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις με χρήση κατανεμημένης μνήμης. Αυτό είναι εφικτό μόνο όταν διατίθενται οι κατάλληλοι μεταγλωτιστές και βιβλιοθήκες που συμβάλλουν στην ταυτόχρονη προσομοίωση. Το έργο εκτελείται από το πρόγραμμα ungrib το οποίο δεν μπορεί να υποστηρίξει την παράλληλοποίηση, με αποτέλεσμα το ungrib να μπορεί να εκτελεί τις διαδικασίες προσομοίωσης σε ένα μόνο επεξεργαστή. (ucar.edu ‘WRF Preprocessing System (WPS)’).



Σχήμα 25: Η ροή δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων του WPS.

2.2.4 Δυναμική υποκλιμάκωση

Για να γίνει πιο κατανοητός ο ρόλος του WRF, που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα πρέπει να κάνουμε μια σύντομη περιγραφή του βασικού λόγου για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε που είναι η δυναμική υποκλιμάκωση. Το WRF ως Περιφερειακό Κλιματικό Μοντέλο κάνει παρόμοια δουλειά με τα GCM, αλλά για μια περιορισμένη περιοχή της Γης. Καλύπτοντας μια μικρότερη περιοχή, το RCM μπορεί γενικά να λειτουργεί πιο γρήγορα και σε υψηλότερη ανάλυση από τα GCM. Ένα μοντέλο με υψηλή ανάλυση έχει μικρότερα κελιά και επομένως μπορεί να παράγει λεπτομερέστερες πληροφορίες για το κλίμα για μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτός είναι και ο ρόλος του WRF στην παρούσα εργασία, να δώσει μια ακριβή αποτελέσματα για συγκεκριμένες περιοχές έτσι ώστε όταν γίνει η στατιστική ανάλυση των τιμών των μεταβλητών που εξετάζονται, τα αποτελέσματα να είναι πιο ακριβή. Τα περιοχικά μοντέλα όπως το WRF, εξάγουν αποτελέσματα για γεωγραφικές περιοχές σε υψηλότερη διακριτική ικανότητα, τυπικά μεταξύ 10-50 χλμ.



Σχήμα 26: Υποκλιμάκωση από μοντέλο γενικής κυκλοφορίας σε περιφερειακό μοντέλο για την καλύτερη εξέταση της υπό μελέτη περιοχής. (Arraricio 2012)

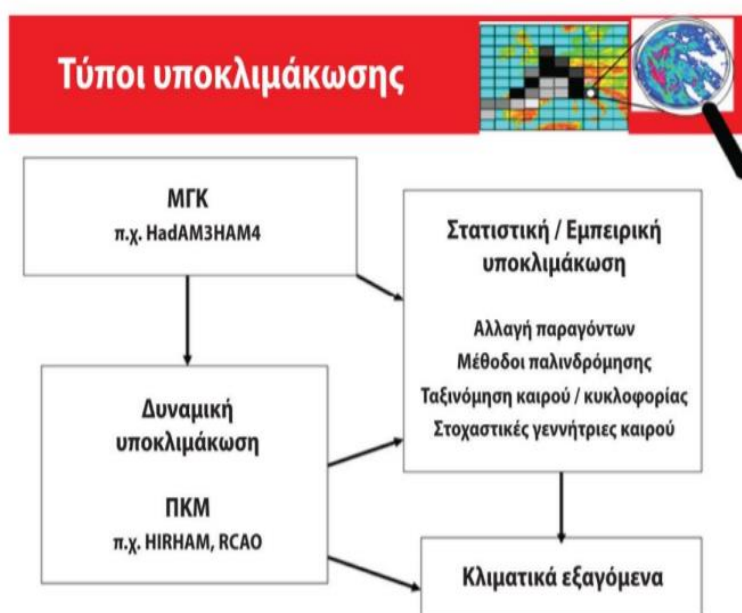
Η υποκλιμάκωση βασίζεται στην αρχή ότι είναι δίνει τη δυνατότητα να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από στατιστικές αναλύσεις, μεταξύ τοπικού και μεγάλης

κλίμακας κλίματος. Αυτές οι σχέσεις ισχύουν σε μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Δηλαδή, το μεγάλης κλίμακας κλίμα χρησιμοποιείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή για το τοπικό κλίμα, που είναι η εξαρτημένη μεταβλητή. Οι τεχνικές χωρικής υποκλιμάκωσης μπορεί να διακριθούν σε **εμπειρικές/στατιστικές μεθόδους**, καθώς και σε **στατιστικές/δυναμικές μεθόδους**.

Στις **δυναμικές μεθόδους υποκλιμάκωσης** (Tariador et al., 2020), πρέπει πρώτα να ορίσουμε τις περιοχές στις οποίες πρόκειται να εκτελέσετε. Επίσης κάνουμε παραδοχές στα όρια αυτής της περιοχής κλιματικά χαρακτηριστικά μοντέλου μεγάλης κλίμακας, οπότε είναι η πληροφορία μεγαλύτερου μεγέθους μοντέλου που οδηγεί στη συνέχεια το μοντέλο μικρότερης κλίμακας.

Η δεύτερη κύρια κατηγορία της υποκλιμάκωσης είναι η "**στατιστική υποκλιμάκωση**" (Benestad, 2004). Αυτό συνεπάγεται τη χρήση δεδομένων που έχουν καταγραφεί για τη δημιουργία μιας στατιστικής σχέσης μεταξύ του παγκόσμιου και του τοπικού κλίματος. Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση, οι επιστήμονες στη συνέχεια λαμβάνουν αλλαγές σε τοπικό επίπεδο με βάση τις προβολές μεγάλης κλίμακας που προέρχονται από τα GCM ή τις παρατηρήσεις.

Ένα παράδειγμα στατιστικής υποκλιμάκωσης είναι η πρόγνωση των κλιματικών συνθηκών στο μέλλον χρησιμοποιώντας ωριαίες, ημερήσιες τιμές των μεταβλητών που εξετάζονται. Τα δεδομένα αυτά που έχουν παρατηρηθεί από μετεωρολογικούς σταθμούς συνδυάζονται με προσομοιώσεις που αφορούν το μέλλον για να γίνει μια προσέγγιση ενός πιθανού μελλοντικού σεναρίου.



Σχήμα 27: Τύποι υποκλιμάκωσης (Διαλέξης, 2015)

Στην παρούσα εργασία για παράδειγμα χρησιμοποιούμε τιμές της ταχύτητας του ανέμου που έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν και τα συνδυάζουμε με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα κλιματικά μοντέλα NASA GISS ModelE και WRF για να προβλέψουμε το μελλοντικό αιολικό δυναμικό που πρόκειται να διαμορφωθεί στις υπό μελέτη περιοχές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.Μεθοδολογία προσομοίωσης και υπολογισμού ηλεκτρικής απόδοσης.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η συνολική μεθοδολογία για την κλιματική προσομοίωση και για τον υπολογισμό της μελλοντικής παραγόμενης ισχύος των αιολικών πάρκων που επιλέχθηκαν να εξεταστούν.

3.1 Επιλογή των κατάλληλων περιοχών και η διαδικασία προσομοίωσης

Το πρώτο βήμα για τη διαδικασία της προσομοίωσης ήταν η επιλογή των κατάλληλων περιοχών που επιλέχθηκαν να μελετηθούν στην παρούσα εργασία. Η ευρύτερη περιοχή για την οποία έγιναν προσομοιώσεις περιέχει την Ευρώπη, τη Δυτική Τουρκία και τα παράλια της Β. Αφρικής. Σε πρώτο στάδιο οι πλεγματικές περιοχές του μοντέλου WRF έχουν διαστάσεις 108km x 108 km.Ο λόγος δυναμικής υποκλιμάκωσης που επιλέχθηκε ήταν ένα προς τρία με αποτέλεσμα οι διαδοχικές υποπεριοχές που διαμορφώθηκαν να έχουν διάσταση 36km x 36km.Με τη συγκεκριμένη χωρική ανάλυση έγινε η προσομοίωση των υπό μελέτη μεταβλητών για όλο το χωρικό πλέγμα. Στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώνεται στα χωρικά πλέγματα στα οποία εντοπίζονται τα αιολικά πάρκα που έχουν επιλεχθεί να μελετηθούν στην παρούσα εργασία. Αφού γίνεται η συλλογή των τιμών των μεταβλητών που αφορούν τα συγκεκριμένα χωρικά πλέγματα, γίνεται υπολογισμός του αιολικού δυναμικού των περιοχών που είναι εγκατεστημένα τα αιολικά πάρκα. Τέλος υπολογίζεται η μελλοντική ισχύς των αιολικών πάρκων και στη συνέχεια συγκρίνεται με τα δεδομένα του παρελθόντος που αφορούν τη χρονική περίοδο 2008 2012.



Σχήμα 28:Η περιοχή που προσομοιώνει το αριθμητικό μοντέλο WRF

Οι μεταβλητές που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η θερμοκρασία στα δύο μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου στα 50 μέτρα από το έδαφος. Η προσομοίωση των συγκεκριμένων μεταβλητών έγινε για τις χρονικές περιόδους 2008 -2012 και 2048 -2052 μέσω του μοντέλου WRF για όλο το εύρος του χωρικού πλέγματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή των μεταβλητών για τις

δύο πενταετίες και η ποσοστιαία διαφορά τους για την αποτύπωση των αλλαγών που πρόκειται να προκύψουν.

Στο δεύτερο στάδιο των υπολογισμών η μελέτη επικεντρώνεται στα αιολικά πάρκα που θέλουμε ένα εξετάσουμε την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγόμενη ισχύ τους. Ωστόσο το WRF εκτελεί προσομοίωση για 42706 κελιά, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό των κελιών στα οποία εγκαθίστανται τα αιολικά πάρκα. Έτσι χρησιμοποιήσαμε τη γλώσσα προγραμματισμού Python, με τη χρήση της οποίας έγινε ο εντοπισμός των κελιών που είναι εγκατεστημένα τα αιολικά πάρκα και στη συνέχεια η εξαγωγή των τιμών των μεταβλητών που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα οι τιμές των μεταβλητών στο πρόγραμμα WRF, ταξινομούνται σε πίνακες τεσσάρων διαστάσεων όπου κάθε μία αφορά την εξεταζόμενη μεταβλητή, τη χρονική στιγμή που γίνεται η προσομοίωση, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του γεωγραφικού κελιού. Οι περιοχές που βρίσκονται τα αιολικά πάρκα που θέλουμε να μελετήσουμε βρίσκονται στην Πελοπόννησο, την Εύβοια και την Κρήτη. Οι διαστάσεις που αφορούν τις γεωγραφικές συντεταγμένες κωδικοποιούνται όχι με τις αληθινές συντεταγμένες τους αλλά με συγκεκριμένο αριθμούς που αφορούν τη στήλη και τη γραμμή του πίνακα που είναι ταξινομημένα τα δεδομένα των μεταβλητών. Εφόσον δώσαμε τις επιθυμητές τιμές σε κάθε διάσταση, λάβαμε τις τιμές των μεταβλητών που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε για κάθε αιολικό πάρκο. Οι τιμές των μεταβλητών που λάβαμε είναι μέσες μηνιαίες τιμές για το πρώτο στάδιο της μελέτης μας και στη συνέχεια που η μελέτη επικεντρώνεται στη μελέτη της αιολικής ισχύος των πάρκων γίνεται χρήση ωριαίων τιμών της ταχύτητας. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή των ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου στα χωρικά κελιά που εντοπίζονται τα αιολικά πάρκα. Η εκτέλεση του παρακάτω κώδικα γίνεται για κάθε μέρα των δυο χρονικών περιόδων, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τη στατιστική ανάλυση του ανέμου που αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

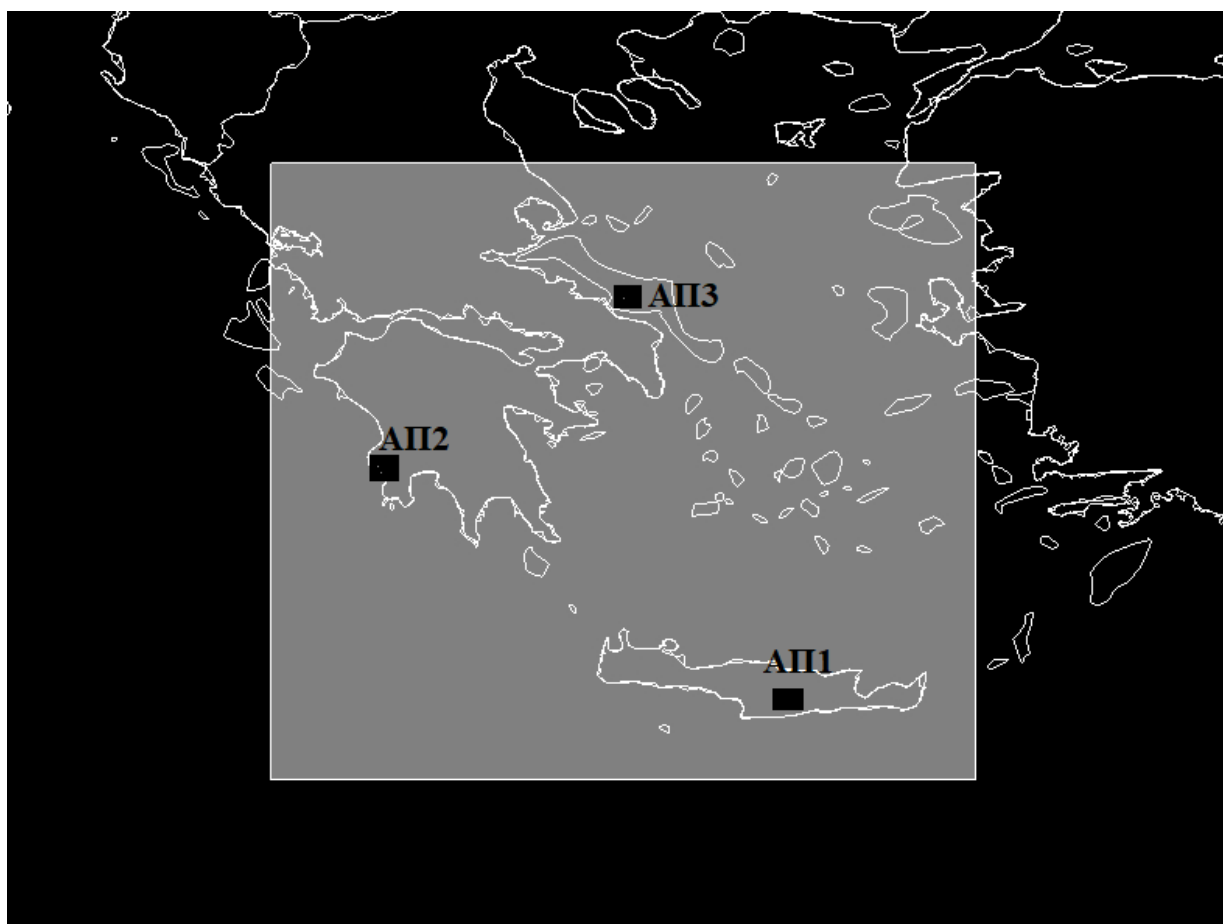
```
In [6]: import netCDF4 as nc
import csv
#vn1 = nc.MFDataset('C:\\Users\\ggiot\\Desktop\\simulations\\hourly_data_wspd10\\20082012_extract\\2008_extrac
vn1=nc.MFDataset('C:\\Users\\ggiot\\Desktop\\simulations\\hourly_data_wspd10\\20082012_extract\\2012_extract\\c
airv1=vn1.variables['WSPD10'][:]
row=airv1[:,108,243].flatten()
print(row)
```

```
[10.731074 10.70489 11.27266 8.853334 7.975371 7.605492
 7.6633744 7.644809 7.6111565 8.655073 9.44444 9.8485775
10.605269 10.741081 11.162298 11.176371 11.546982 11.946008
11.944822 11.22598 10.261557 9.7052 10.242363 10.396828 ]
```

Σχήμα 29:Χρήση γλώσσας προγραμματισμού Python για την εξαγωγή ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου, σε συγκεκριμένο χωρικό κελί.

Τέλος πέραν των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν για τις δύο χρονικές περιόδους, ήταν απαραίτητο να λάβουμε πραγματικές τιμές των εξεταζόμενων μεταβλητών για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο που χαρακτηρίζεται συνήθως ως περίοδος αναφοράς. Στη συγκεκριμένη εργασία ως περίοδος αναφοράς επιλέχθηκε η πενταετία 2008 2012. Οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις περιόδους αναφοράς, συνήθως προέρχονται από καταγεγραμμένες μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών. Στην παρούσα εργασία

χρησιμοποιήθηκε το **CERA-SAT**, το οποίο εκτελεί μια εκτεταμένη ανάλυση στην κατάσταση της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και της επιφάνειας της γης από το 2008 έως το 2016. Η επανεκτίμηση των μετεωρολογικών παραγόντων προκύπτουν από συνδυασμό κλιματικών μοντέλων με καταγεγραμμένες παρατηρήσεις. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αφομοίωση δεδομένων. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται επίσης στην αριθμητική πρόβλεψη του καιρού. Οι μεταβλητές που λάβαμε από το CERA-SAT για την πενταετία 2008-2012, είναι η ταχύτητα του ανέμου στα εκατό μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, η ατμοσφαιρική πίεση και η θερμοκρασία στα δύο μέτρα. Η χωρική ανάλυση του CERA-SAT είναι 12,5km x 12,5km και οι τιμές που εξήχθησαν αφορούν τη μέση μηνιαία τιμή των εξεταζόμενων μεταβλητών καθώς και την ωριαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου για τα κελιά που εντοπίζονται τα αιολικά πάρκα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα του CERA-SAT, είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο χάρτης των περιοχών για τις οποίες έγινε αποτύπωση πραγματικών ιστορικών δεδομένων που μας παρέχει το CERA-SAT. Επίσης στην ίδια περιοχή φαίνεται η τοποθεσία των αιολικών πάρκων που επιλέξαμε να μελετήσουμε. Το πρώτο αιολικό πάρκο, είναι το αιολικό πάρκο “Περδικοκόρυφη”, που βρίσκεται στον Νομό Ηρακλείου της Κρήτης. Το δεύτερο αιολικό πάρκο “Αγ. Αθανάσιος”, εντοπίζεται στον νομό Μεσσηνίας της Πελοποννήσου και το τρίτο είναι το αιολικό πάρκο “Τσιλικόκα” στην Εύβοια.



Σχήμα 30: Τοποθεσία των υπό μελέτη αιολικών πάρκων

Για να υπολογιστούν οι τιμές των μεταβλητών στο μέλλον, οι ιστορικές τιμές των μεταβλητών που μας παρέχει το CERA-SAT, προστέθηκαν στις τιμές των μεταβλητών που προκύπτει από τη διαφορά των προσομοιώσεων που αφορά τις χρονικές περιόδους 2048 2052 και 2008 2012 αντίστοιχα. Στη συνέχεια εφόσον διαμορφωθούν οι τιμές των μεταβλητών για την εξεταζόμενη

περίοδο, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές του παρελθόντος προκειμένου να παρατηρηθούν οι πιθανές μεταβολές της εκάστοτε μεταβλητής.

3.2 Μεθοδολογία υπολογισμού αιολικού δυναμικού και παραγόμενης ισχύος για τα αιολικά πάρκα.

3.2.1 Μεθοδολογία υπολογισμού ωφέλιμης ισχύος.

Για τον υπολογισμό της ισχύος του ανέμου που πνέει στις περιοχές που έχουν εγκατασταθεί τα πάρκα ήταν απαραίτητη η συλλογή των τιμών της ταχύτητας του ανέμου, της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας για τις τρεις υποπεριοχές που εξετάζονται ξεχωριστά. Συγκεκριμένα αφού εντοπίστηκαν με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού python τα τρία υπό μελέτη κελιά, διαμορφώθηκε ένα σύνολο μέσω μηνιαίων τιμών των μεταβλητών και για τις δυο εξεταζόμενες χρονικές περιόδους.

Η ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια εξαρτάται από την κινητική ενέργεια του ανέμου και τον τύπο της ανεμογεννήτριας που έχει εγκατασταθεί. Για ταχύτητα ανέμου U (m/s), η ωφέλιμη ισχύς P (W) που παράγεται σε μια ανεμογεννήτρια της οποίας ο ρότορας έχει διάμετρο D (m), υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho C_p \bar{v}^3 \pi \frac{D^2}{4} \quad (8) \text{ όπου:}$$

- ρ η πυκνότητα του ανέμου ($\frac{kg}{m^3}$). Συνήθως παίρνει τιμές από 1, 17 $\frac{kg}{m^3}$ ως 1, 21 $\frac{kg}{m^3}$
- \bar{v} η μέση μηνιαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου.
- D η διάμετρος του δρομέα της ανεμογεννήτριας

Ο συντελεστής ισχύος C_p (αδιάστατος), ορίζει το ποσοστό της κινητικής ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Ο υπολογισμός της τιμής P , χρησιμοποιώντας μια σταθερή τιμή του συντελεστή ισχύος ίση με 0, 35 (Hueging et al. 2013, Reyers et al. 2015, Moemken et al. 2016) και τη μέση τιμή της ταχύτητας U , συνήθως υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P_{aw} = \frac{1}{2} \cdot 0,35 \cdot \rho \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \bar{v}^3 \quad (9)$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης και έχοντας εξάγει τη μέση μηνιαία ταχύτητα που επικρατεί σε κάθε αιολικό πάρκο, υπολογίσαμε τη μέση μηνιαία ηλεκτρική παραγωγή τόσο για το παρόν όσο και το μέλλον.

Επίσης η πυκνότητα του ανέμου δεν πήρε σταθερή τιμή στους υπολογισμούς αλλά υπολογίστηκε ξεχωριστά για κάθε μήνα προσομοίωσης από τη σχέση:

$$\rho = \frac{P}{RT} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (10) \text{ όπου:}$$

- P η μέση μηνιαία ατμοσφαιρική πίεση (Pascal)
- T η μέση μηνιαία θερμοκρασία (Kelvin)
- R η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων που ισούται με $R = 287,058 \frac{J}{kg \cdot K}$

Ωστόσο η ταχύτητα του ανέμου που μας δίνει το WRF, έχουν υπολογιστεί για ύψος 50 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Συνήθως ο δρομέας μιας τυπικής ανεμογεννήτριας απέχει από το έδαφος εξήντα με εκατό μέτρα. Για να ανάγουμε τις ταχύτητες που μας δίνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο ύψος των δρομέων της κάθε ανεμογεννήτριας χρησιμοποιήσαμε τον εκθετικό νόμο που περιγράφεται από τη σχέση:

$$U(z) = U(Z_{ref}) \cdot \left(\frac{z}{Z_{ref}}\right)^{\frac{1}{a}} \quad (11) \text{ όπου :}$$

- **U(z):** η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z
- **1/a:** ο εκθέτης του εκθετικού νόμου που σχετίζεται με τη μορφή της επιφάνειας του εδάφους:
- **Z_{ref}:** το ύψος για το οποίο η προσομοίωση μας δίνει την ταχύτητα του ανέμου

3.2.2 Μέθοδος υπολογισμού κατανομής συχνοτήτων

Η παραπάνω σχέση με την οποία υπολογίσαμε τη μηνιαία παραγωγή, λαμβάνει υπόψη της μόνο τη μέση τιμή της ταχύτητας. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα προκύπτουν χωρίς να γίνει στατιστική επεξεργασία του ανέμου προκειμένου να μελετηθεί το εύρος των τιμών γύρω από τη μέση τιμή. Έτσι λοιπόν για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε την κατανομή Weibull για να υπολογίσουμε την πιθανότητα εμφάνισης κάθε ταχύτητας στο ύψος του δρομέα των ανεμογεννητριών του κάθε αιολικού πάρκου. Επιπλέον για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει κάθε αιολικό πάρκο ήταν απαραίτητο να υπολογιστεί η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του δρομέα. Για να υπολογιστεί λοιπόν η συχνότητα εμφάνισης των ταχυτήτων του ανέμου σε κάθε αιολικό πάρκο χρησιμοποιήσαμε τις ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου που μας έδωσαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του WRF, για κάθε έτος των χρονικών περιόδων. Επίσης με τη βοήθεια του μοντέλου CERA-SAT, χρησιμοποιήσαμε τιμές ταχύτητας ανα τρεις ώρες και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης ταχυτήτων του ανέμου στο παρελθόν με την χρήση της κατανομής Weibull.

Σχεδόν όλες οι μακροχρόνιες μετρήσεις (>6 μήνες) του αέρα προσεγγίζονται από την κατανομή Weibull. Ο υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης κάθε ταχύτητας του ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$P(U_X) = \frac{\kappa}{c} \cdot \left(\frac{U_X}{c}\right)^{\kappa-1} e^{-\left(\frac{U_X}{c}\right)^\kappa} \quad (11) \text{ όπου:}$$

- **k:** συντελεστής σχήματος (αδιάστατος)
- **c:** συντελεστής κλίμακας (m/s)

Απαραίτητη για τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού σε ένα τόπο είναι η συνάρτηση της ολικής πυκνότητας πιθανότητας, η οποία δίνει την πιθανότητα η ταχύτητα v να είναι μικρότερη μιας συγκεκριμένης τιμής v₀. Στην περίπτωση της κατανομής Weibull η συνάρτησης ολικής πιθανότητας δίνεται από τη σχέση :

$$F(v < v_0) = 1 - e^{-\left(\frac{v_0}{c}\right)^\kappa} \quad (12)$$

Μετά από λογαρίθμηση της παραπάνω σχέσης, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$\ln(-\ln(1 - F(v < v_0))) = -\kappa \ln C + \ln v_0 \quad (13)$$

Συνεπώς, ο υπολογισμός των παραμέτρων k και C, που αντιστοιχούν στις μετρήσεις μια περιοχής, μπορεί να γίνει με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, προσαρμόζοντας μια ευθεία στις μετρήσεις, δηλαδή:

$$Y = A + BX \quad (14)$$

$$\text{Όπου : } Y = \ln(-\ln(1 - F(v < v_0))) \text{ και } X = \ln v_0 \quad (15)$$

Όταν λοιπόν υπολογιστούν τα A και B με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων από τα υπάρχοντα ανεμολογικά δεδομένα, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των παραμέτρων k και C από τις παρακάτω σχέσεις:

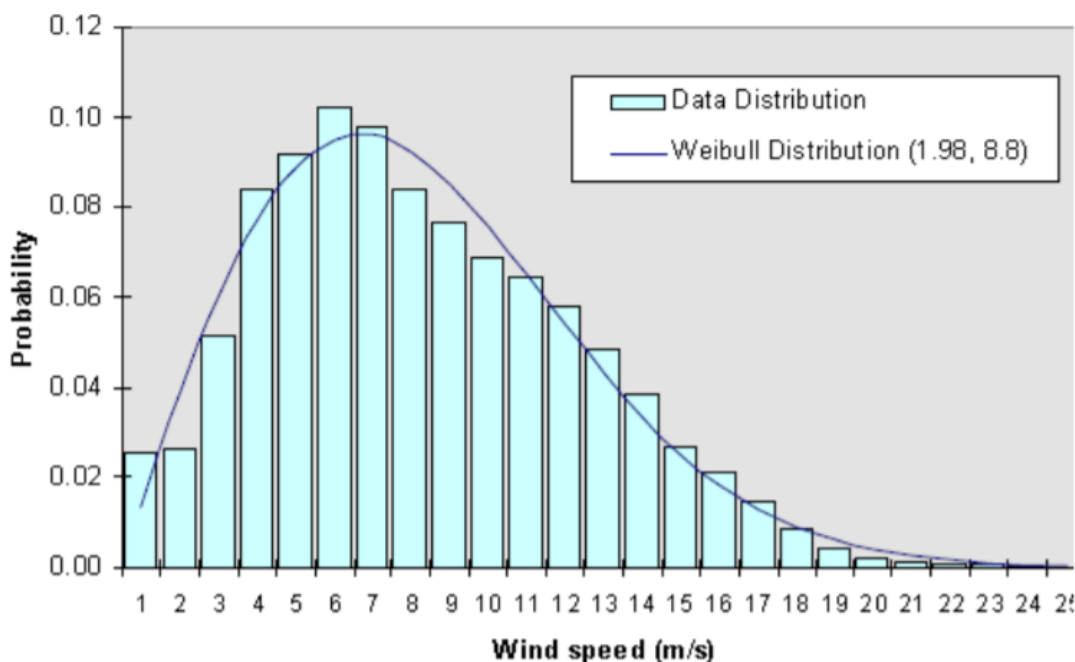
$$k = B \quad (16)$$

$$C = e^{-\frac{A}{B}} \quad (17)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μεθοδολογία, έγινε μια συλλογή των τιμών της ταχύτητας που εμφανίζονται στα υπό μελέτη αιολικά πάρκα και στη συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση του ανέμου για το παρόν και το μέλλον.

Η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100m από το έδαφος. Η ποσότητα P(U) δείχνει πόσες ώρες το έτος (8760 ώρες) ο άνεμος φυσάει με ταχύτητα μεταξύ U-ΔU/2 και U+ΔU/2. Η κατανομή Weibull είναι κανονικοποιημένη αφού ισχύει ότι :

$$\int_0^{\infty} P(U) \cdot d(U) = 1 \quad (18)$$



Σχήμα 31:Κατανομή Weibull για τη συχνότητα εμφάνισης ταχυτήτων του ανέμου με k=1,98 και c=8,8. Πηγή: Βαφειάδης, 2018.

Η κατανομή Weibull είναι πολύ σημαντική για την αιολική βιομηχανία αφού μπορεί να περιγράψει τη μεταβολή των ταχυτήτων του ανέμου. Οι σχεδιαστές στροβίλων χρειάζονται τις πληροφορίες για να βελτιστοποιήσουν το σχεδιασμό των στροβίλων τους, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής. Οι επενδυτές στροβίλων χρειάζονται τις πληροφορίες τους για να υπολογίσουν το εισόδημά τους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εάν μετρήσουμε τις ταχύτητες ανέμου καθ 'όλη τη διάρκεια ενός έτους, θα παρατηρήσουμε ότι στις περισσότερες περιοχές οι ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ οι μέτριας έντασης άνεμοι είναι αρκετά συνηθισμένοι. Για τις παραμέτρους της κατανομής, όσο μεγαλύτερες οι τιμές των c και k τόσο καλύτερο είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής.

Η ίδια κατανομή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συχνότητας εμφάνισης των ταχυτήτων του ανέμου, στα ανεμολογικά δεδομένα που λάβαμε από το cera-sat για να

υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια των αιολικών πάρκων με τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών.

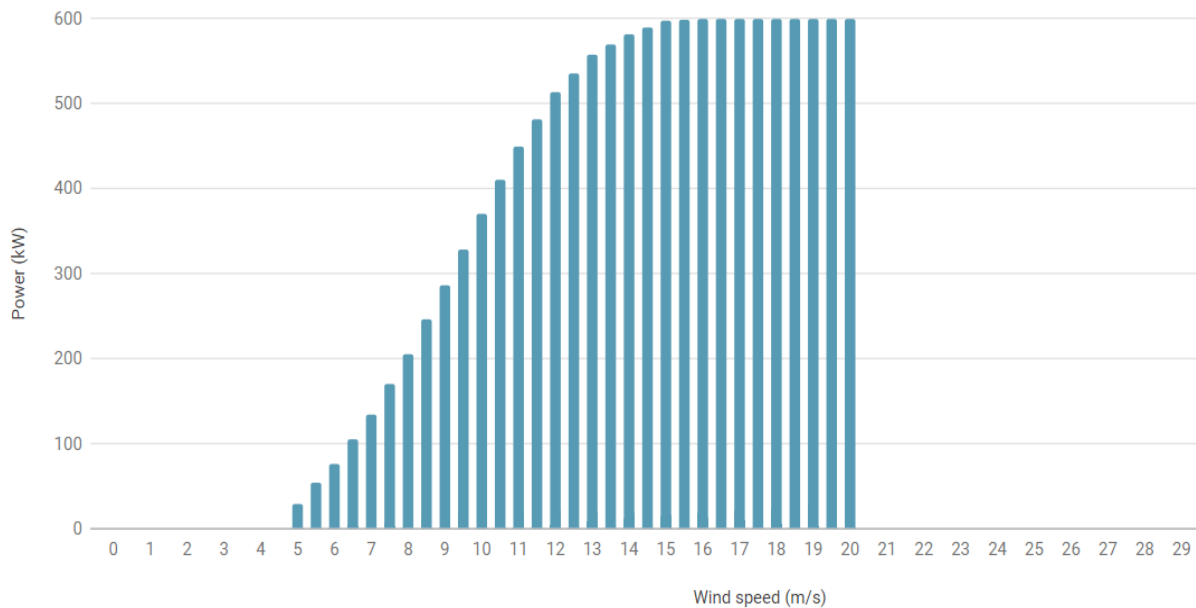
Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάθε αιολικό πάρκο έχουν εγκατασταθεί διαφορετικού τύπου ανεμογεννήτριες, γεγονός που σημαίνει ότι οι ταχύτητες έναρξης περιστροφής των πτερυγίων καθώς και οι ταχύτητες για τις οποίες σταματάνε να περιστρέφονται τα πτερύγια μπορεί να διαφέρουν. Επίσης λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών όπως οι συντελεστές απόδοσης και η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο και είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε πάρκου.

3.2.3 Μεθοδολογία υπολογισμού ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε κάθε αιολικό πάρκο

Με βάση τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου που προέβλεψε το μετεωρολογικό μοντέλο WRF τόσο για το παρόν όσο και το μέλλον υπολογίστηκε η μεταβολή του αιολικού δυναμικού στα υπό εξέταση αιολικά πάρκα. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε η μεταβολή για τη μηνιαία ταχύτητα του ανέμου στο ύψος των ανεμογεννητριών, τη μηνιαία και την ετήσια ηλεκτρική παραγωγή των πάρκων. Επίσης αφού εξήχθησαν ωριαίες τιμές της ταχύτητας στα πενήντα μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους έγινε μια στατιστική επεξεργασία του ανέμου για να προσδιοριστούν σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν την στατιστική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου που εμφανίζονται στα αιολικά πάρκα. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μεταβολές για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε μηνιαία και ετήσια βάση. Η ίδια ακριβώς διαδικασία εκτελέστηκε και για τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών που εξάγονται από το CERA-SAT, για τη χρονική περίοδο 2008-2012. Στη συνέχεια οι τιμές που υπολογίσαμε προστέθηκαν στη μεταβολή που εκτιμά το WRF για τις αντίστοιχες μεταβλητές, με σκοπό να διαμορφωθούν οι τιμές που καθορίζουν τα αιολικά χαρακτηριστικά των πάρκων για το μέλλον.

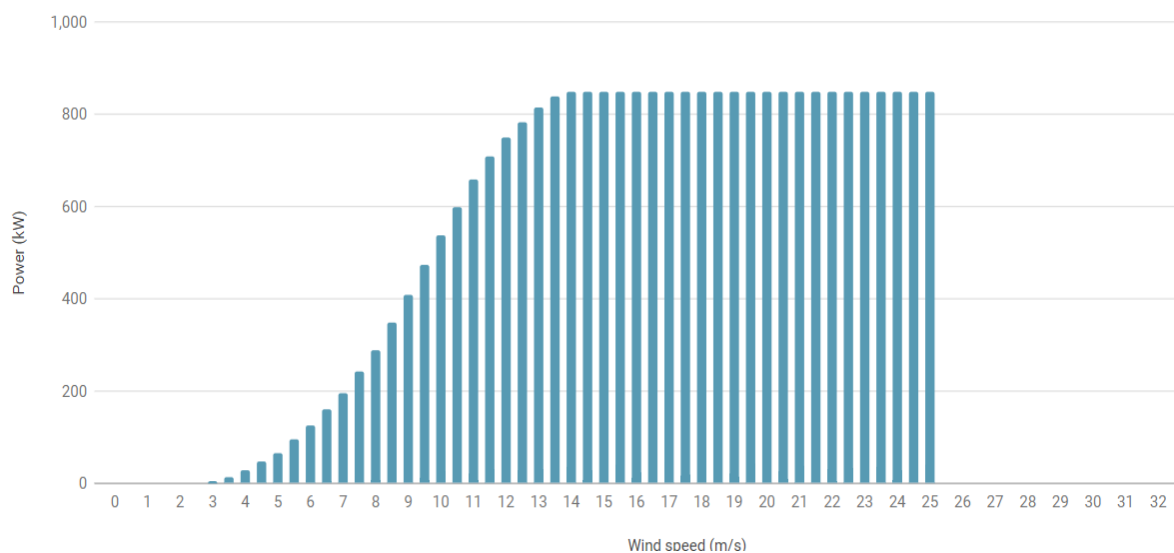
Προτού προχωρήσουμε στην περιγραφή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, κρίνουμε απαραίτητο να δώσουμε κάποιες τεχνικές πληροφορίες που αφορούν τις ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί σε κάθε πάρκο.

Το αιολικό πάρκο στην **Εύβοια** ($38^{\circ} 20' 14.9''$, $24^{\circ} 5' 41.6''$), αποτελείται από 17 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V44/600, συνολικής ισχύος 10, 200 kW. Η διάμετρος των πτερυγίων τους είναι 44 μέτρα και κάθε ανεμογεννήτρια είναι ικανή να αποδώσει ως και 600kw. Παρακάτω απεικονίζεται η καμπύλη ισχύος του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας.



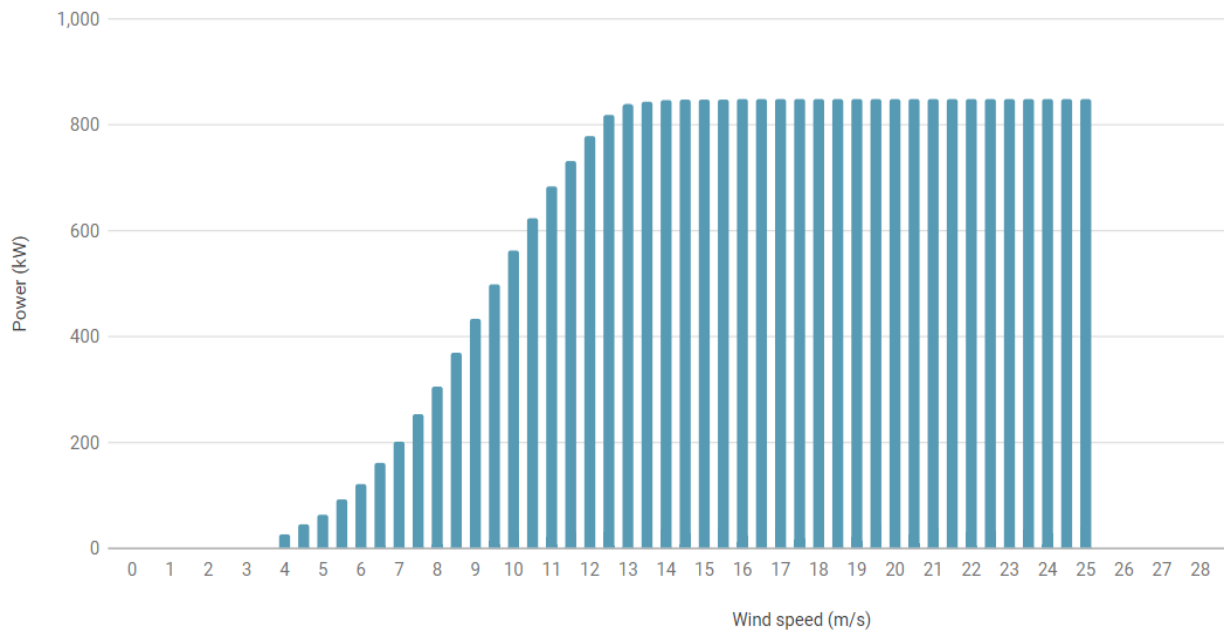
Σχήμα 32:Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Vestas V44/600.Πηγή: thewindpower.net

Το δεύτερο αιολικό πάρκο που εξετάζεται βρίσκεται στο νομό Ηρακλείου της Κρήτης, ($35^{\circ} 9' 1.6'' 24^{\circ} 58' 41.6''$) και αποτελείται από 17 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V52/850. Η συνολική ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου είναι 14, 450 kW. Το ύψος των δρομέων είναι 65 μέτρα από το έδαφος. Τα πτερύγια της ξεκινούν να περιστρέφονται για ταχύτητα 3 m/s και σταματάνε την περιστροφή στα 25 m/s. Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας του συγκεκριμένου τύπου.



Σχήμα 33:Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Vestas V52/850. Πηγή: thewindpower.net

Το τρίτο αιολικό πάρκο που εξετάζεται βρίσκεται στην περιοχή της **Πελοποννήσου** ($36^{\circ} 52' 43''$, $21^{\circ} 41' 51.9''$) και αποτελείται από 8 ανεμογεννήτριες τύπου Gamesa G52/850. Η συνολική ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου είναι 6, 800 kw. Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη ισχύος του τύπου ανεμογεννήτριας που έχει εγκατασταθεί στο αιολικό πάρκο.



Σχήμα 34: Καμπύλη ισχύος Gamessa G52/850. Πηγή: thewindpower.net

Οι καμπύλες ισχύος περιγράφουν την ισχύ **P_{oi}** που προσλαμβάνει ο δρομέας και υπολογίζεται από το γινόμενο της ειδικής ισχύος του δρομέα και της επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια του. Η ειδική ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{oi}^* = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{p_n} \cdot v_N^3 \quad (19) \text{ όπου:}$$

- C_{p_n} : Ο συντελεστής απόδοσης της ανεμογεννήτριας που παίρνει σταθερές τιμές από την ονομαστική τιμή της ταχύτητας μέχρι την ταχύτητα που τα πτερύγια του δρομέα σταματάνε να περιστρέφονται.

Οι τιμές αυτές της ισχύος που αποδίδει κάθε τύπος ανεμογεννήτριας, δίνονται από τις καμπύλες ισχύος.

Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει τις συχνότητες εμφάνισης των ταχυτήτων του ανέμου στο ύψος της ανεμογεννήτριας και θεωρώντας γνωστές τις τιμές της ισχύος που αποδίδει κάθε τύπος ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα που διαπερνά το δρομέα τους, υπολογίζεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη σχέση:

$$E_{el} = n_{el} \cdot P_{oi} \cdot t_i \quad (20)$$

Όπου οι ώρες του έτους κατά τις οποίες ο άνεμος έχει ταχύτητα ν_{hi} υπολογίζονται από τη σχέση:

$$t_i = h_i \times 24 \times 365 \quad (21)$$

- n_{el} : η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα της Α/Γ

Η ίδια διαδικασία υπολογισμών πραγματοποιείται και για την περίοδο αναφοράς (2008-2012), με πραγματικά δεδομένα. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές τους με αυτές που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις για τη χρονική περίοδο 2048-2052 και εξάγονται τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την ολοκλήρωση της κλιματικής προσομοίωσης με την διαδικασία που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα αποτυπωθούν σε χάρτες με τη βοήθεια του προγράμματος IDV Unidata. Οι μεταβλητές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Η μεταβολή των τιμών των μεταβλητών που θα εμφανιστούν στο μέλλον, αποτυπώνεται στους χάρτες του IDV, για υπό μελέτη περιοχή που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παράλληλα παρουσιάζονται γραφήματα που περιγράφουν την τιμή των μεταβλητών για την ιστορική περίοδο (δηλ., 2008-2012) σε περιοχές του ελλαδικού χώρου, στις οποίες εντοπίζονται τα αιολικά πάρκα που μελετώνται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του CERA-SAT. Τέλος για κάθε αιολικό πάρκο ξεχωριστά υπολογίζεται η ετήσια κατανομή συχνότητας ανέμων και η ετήσια ηλεκτρική παραγωγή τόσο για την ιστορική περίοδο (2008-2012) όσο και για το μέλλον (2048-2052), προκειμένου να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα για τη μεταβολή που πρόκειται να παρουσιάσουν στο μέλλον.

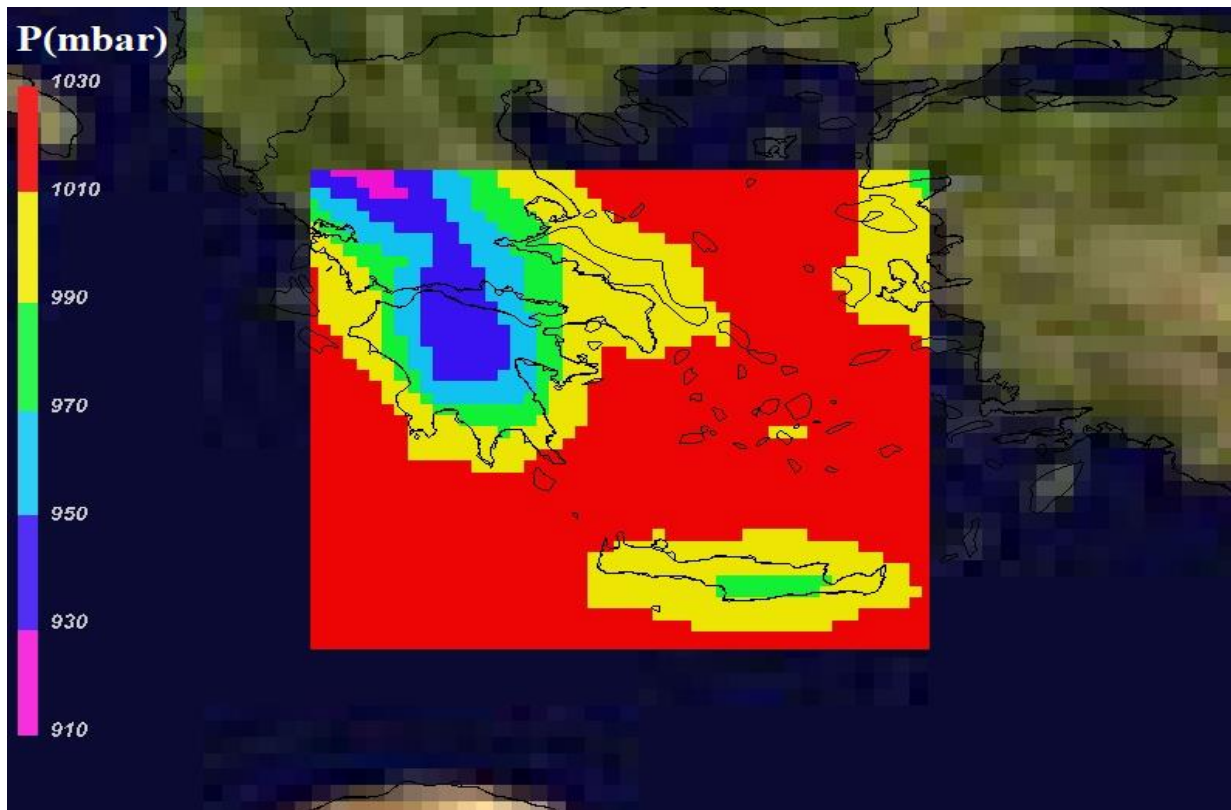
4.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων WRF

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του WRF.

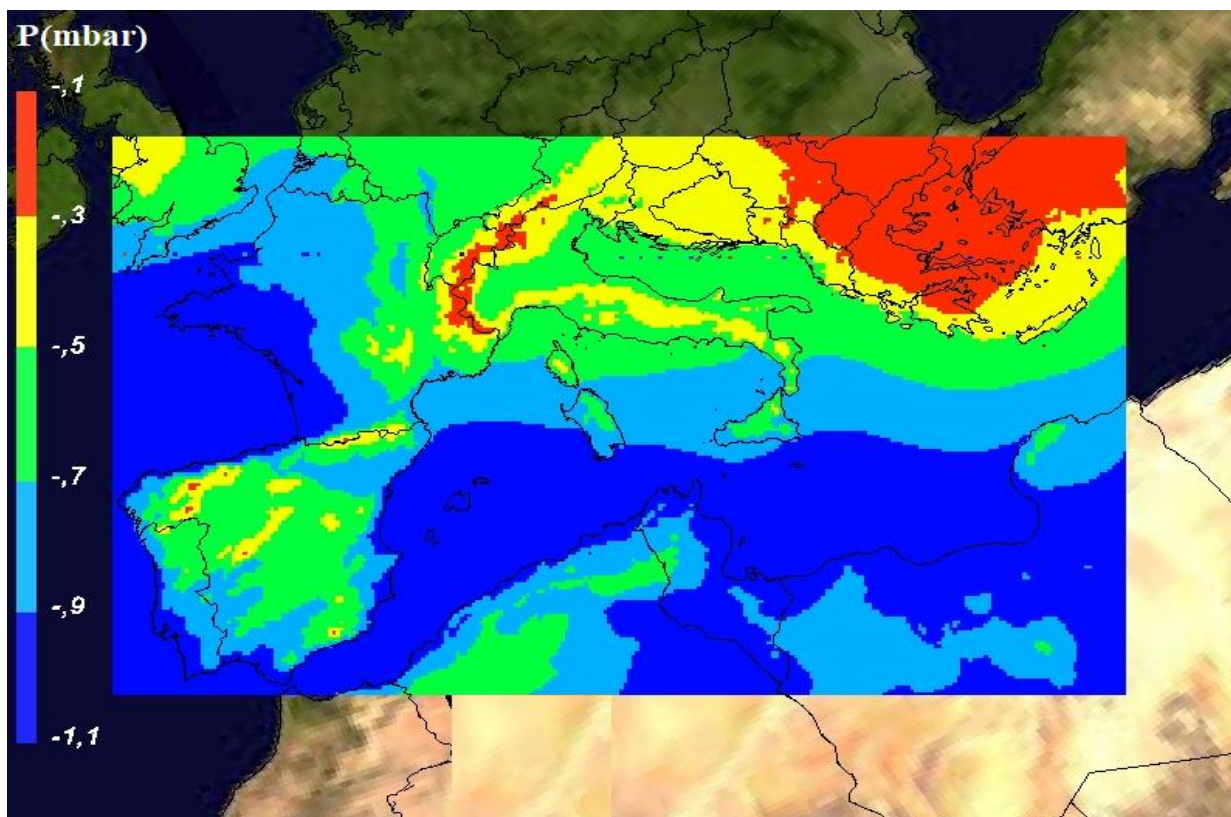
4.1.1 Πίεση εδάφους

Η πίεση επιφάνειας είναι ουσιαστικά η ατμοσφαιρική πίεση σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια της Γης (έδαφος, ωκεανός) και είναι άμεσα ανάλογη με τη μάζα του αέρα πάνω από αυτή. Για αριθμητικούς λόγους τα κλιματικά μοντέλα, όπως τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCM), συνήθως εξετάζουν τον μη διακριτό λογάριθμο της επιφανειακής πίεσης. Η μέση τιμή της επιφανειακής πίεση στη Γη είναι 985 hPa. Η μέση πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας στη διεθνή πρότυπη ατμόσφαιρα (ISA) είναι 1013, 25 hPa ή 1 atm. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η μεταβολή της επιφανειακής πίεσης που προκύπτει από την προσομοίωση του WRF για την ευρύτερη περιοχή μελέτης, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 38 Η μεταβολή αυτή προκύπτει από τη διαφορά των μέσων όρων της επιφανειακής πίεσης των χρονικών περιόδων 2048-2052 και 2008-2012 αντίστοιχα.

Στο παρακάτω σχήμα 4.1.2 παρουσιάζεται το γράφημα που αποτυπώνει την κατανομή της επιφανειακής πίεσης με βάση ιστορικά, πραγματικά δεδομένα από το CERA-SAT, για μια περιοχή του ελλαδικού χώρου. Αυξημένη φαίνεται να είναι η επιφανειακή πίεση στα νησιά του αιγαίου, γεγονός που δικαιολογείται από τις αυξημένες θερμοκρασίες και το υψηλό αιολικό δυναμικό.



Σχήμα 35: Πίεση εδάφους με βάση πραγματικά δεδομένα του CERA-SAT για την περίοδο 2008-2012

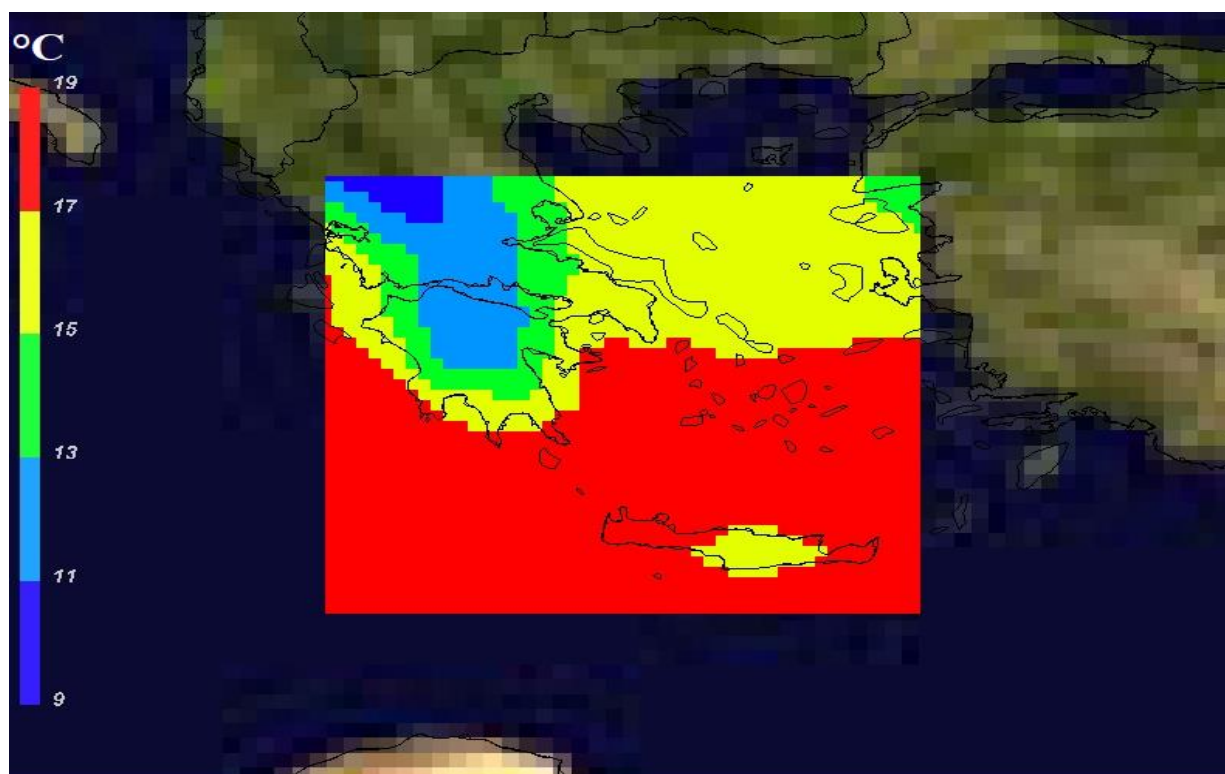


Σχήμα 36: Διαφορά μέσων όρων πίεσης εδάφους για τις χρονικές περιόδους 2008-2012 και 2048-2052

Τα επίπεδα μεταβολής φαίνεται να κυμαίνονται από -1,1 έως -0,1 mbar που αποτελεί μια αμελητέα μεταβολή της επιφανειακής πίεσης, χωρίς να είναι ικανή να επιδράσει στην κίνηση των αέριων μαζών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ή των ωκεανών.

4.1.2 Θερμοκρασία στα 2 μέτρα

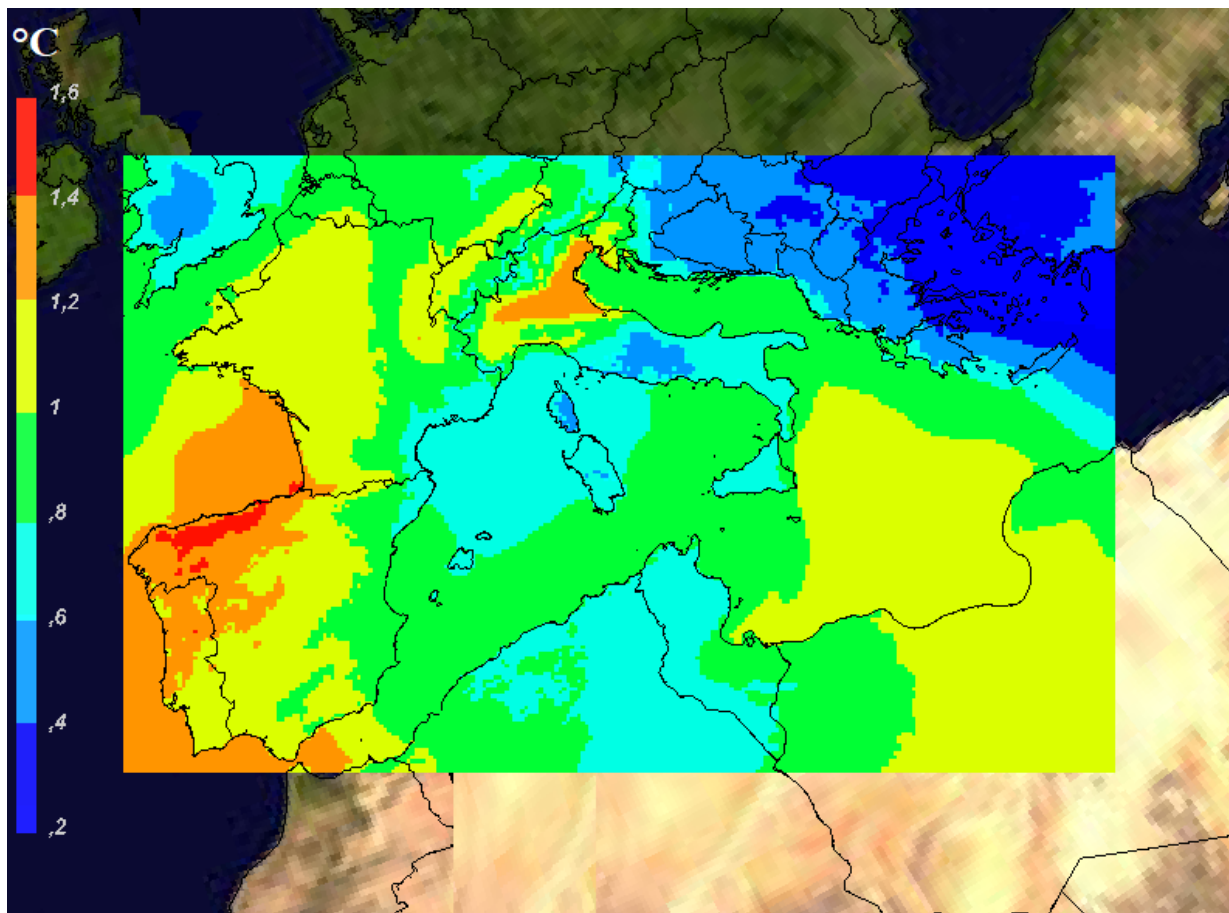
Στο Σχήμα 39 αποτυπώνεται η κατανομή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας σε τμήμα του Ελλαδικού χώρου με βάση πραγματικά δεδομένα από το CERA-SAT που αφορούν την περίοδο 2008-2012. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στη νότια Ελλάδα, και τις Κυκλάδες να συγκεντρώνει τις υψηλότερες τιμές, γεγονός που δικαιολογεί την ξηρασία αυτών των περιοχών. Η ηπειρωτική Ελλάδα και περιοχές με υψηλό υψόμετρο φαίνεται να έχουν μικρότερη θερμοκρασία. Προβλέπεται από την προσομοίωση του WRF ότι στο μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι μέχρι 0,6 βαθμούς Κελσίου, ενώ σε ορισμένα σημεία της δυτικής Πελοποννήσου και Κρήτης η θερμοκρασία θα αυξηθεί μέχρι και 0,8 βαθμούς Κελσίου. Η αύξηση αυτής της θερμοκρασίας όπως αναφέρθηκε πιο πάνω μπορεί να έχει επιπτώσεις στον αγροτικό τομέα της χώρας, αυξάνοντας την ξηρασία του εδάφους. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα, παράμετρος απαραίτητη για τον υπολογισμό της ισχύος του ανέμου.



Σχήμα 37: Πραγματική Θερμοκρασία στα 2 μέτρα, για τη χρονική περίοδο 2008-2012

Όπως φαίνεται στο σχήμα 40 η αύξηση της θερμοκρασίας κυμαίνεται από 0,2°C ως και 1,6°C. Σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται να διαμορφώνεται στις παράκτιες περιοχές της Ισπανίας και της Γαλλίας, οι οποίες υπόκεινται στα ρεύματα αέρα του ατλαντικού ωκεανού. Λιγότερη, αλλά εξίσου σημαντική, αύξηση φαίνεται να γνωρίζουν και οι περιοχές της Μεσογείου και της κεντρικής Ευρώπης, ενώ οι περιοχές των Βαλκανίων και του Αιγαίου Πελάγους, φαίνεται να γνωρίζουν αύξηση θερμοκρασίας ως και 0,4 °C.

Η εκτιμώμενη αύξηση της θερμοκρασίας για την περιοχή μελέτης φαίνεται να είναι πολύ κοντά στο επιτρεπτό όριο της συμφωνίας του Παρισιού, γεγονός που αποτελεί σοβαρή προειδοποίηση για τις καταστροφικές συνέπειες της υπερθέρμανσης του πλανήτη στο περιβάλλον.

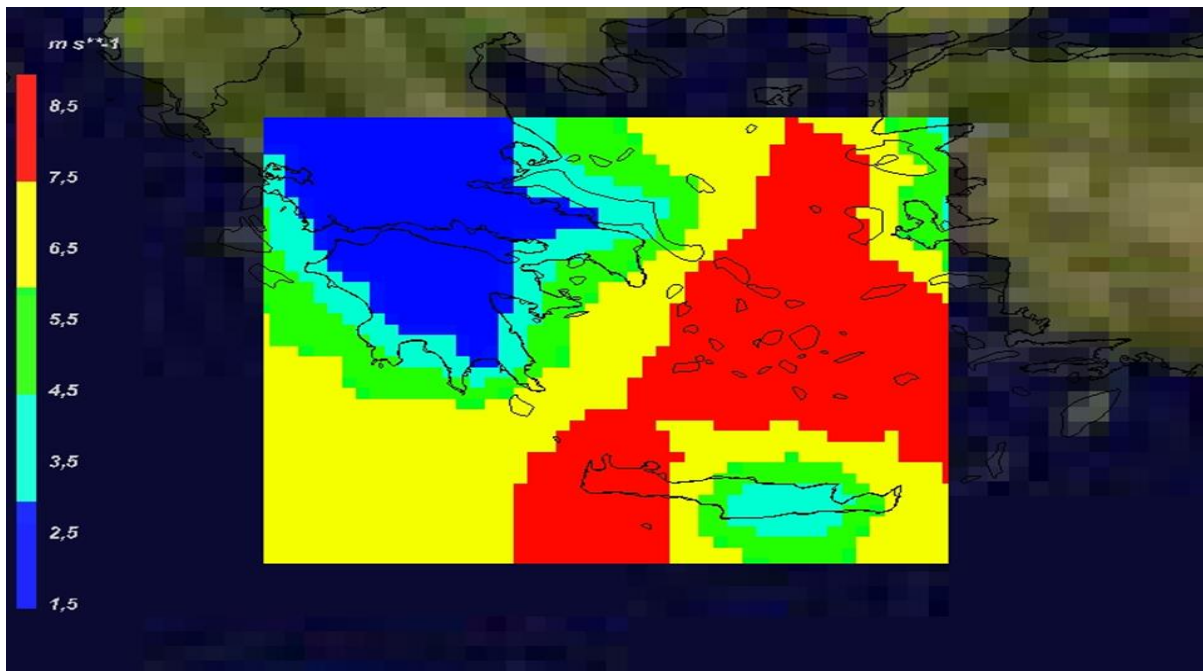


Σχήμα 38: Διαφορά μέσων όρων θερμοκρασίας στα 2 μέτρα

4.1.3 Ταχύτητα και φορά του ανέμου

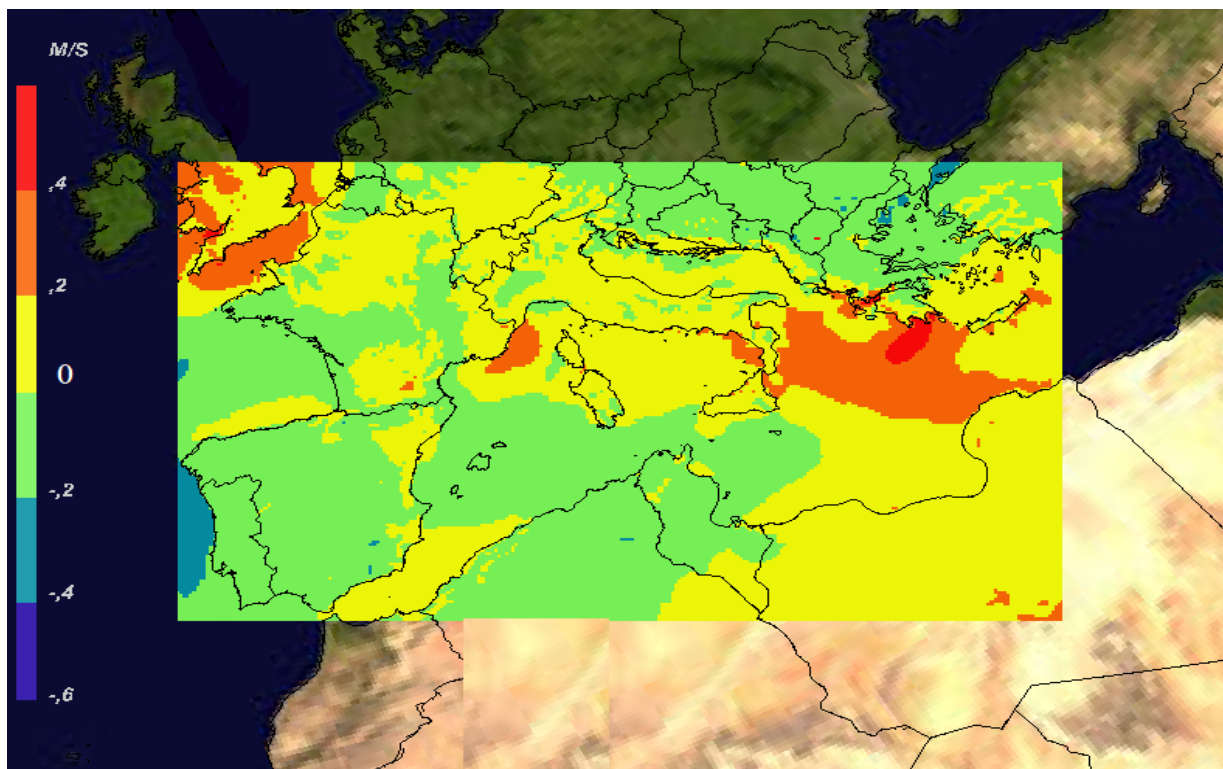
Παρακάτω παρουσιάζεται τα αποτελέσματα τη μεταβολή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου για τις περιοχές που εξετάζονται. Στο πρώτο σχήμα γίνεται απεικόνιση του αιολικού δυναμικού σε περιοχές της Ελλάδας, που παρουσιάζουν πλούσιο και ποιοτικό αιολικό δυναμικό. Οι μέσες τιμές του ανέμου είναι ιδιαίτερα υψηλές για τα νησιά του Αιγαίου και ιδίως για τα νησιά των Κυκλάδων όπου οι ταχύτητες κυμαίνονται από 7,5 - 8,5 m/sec. Στην ηπειρωτική Ελλάδα οι ταχύτητες κυμαίνονται 2-4,5 m/sec, ενώ ιδιαίτερα υψηλοί άνεμοι εμφανίζονται στην Κρήτη και ιδίως στο δυτικό της μέρος.

Για το θαλάσσιο τμήμα της Ελλάδας οι τιμές της ταχύτητας είναι ψηλές (>5 m/sec), διαμορφώνοντας ένα πλούσιο αιολικό και καλής ποιότητας αιολικό δυναμικό.



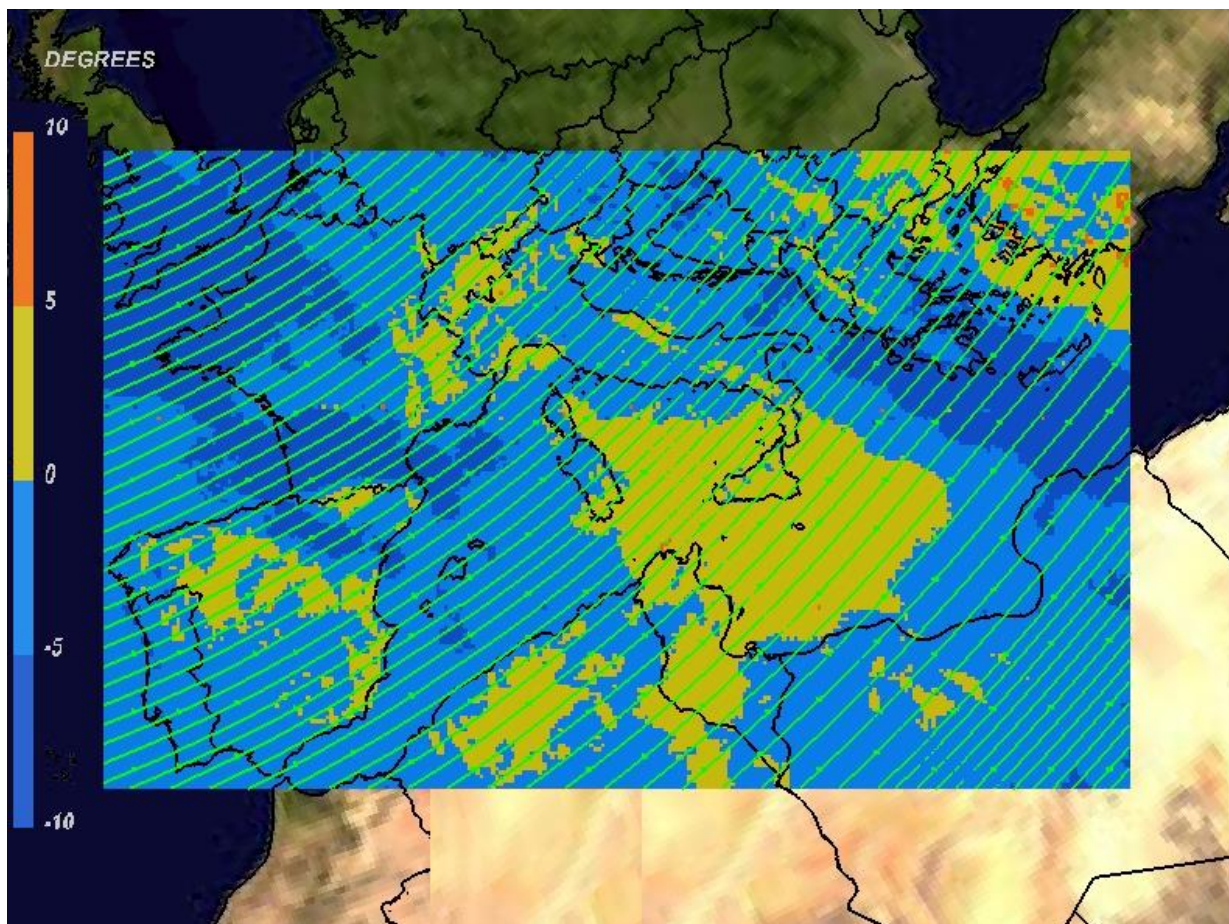
Σχήμα 39: Ταχύτητα ανέμου για την περίοδο βάσης

Ο υπολογισμός των μεταβλητών έγινε σε απόσταση 50 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, που αντιστοιχεί στο μέσο ύψος των ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στις περιοχές μελέτης. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται ότι η ταχύτητα του ανέμου δε θα υποστεί σημαντικές μεταβολές. Στις δυτικές παράκτιες περιοχές της ιβηρικής χερσονήσου και στον Βόσπορο φαίνεται να υπάρχει μια μείωση της ταχύτητας ως και 0,6 m/s. Αύξηση φαίνεται να παρουσιάζει η ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές της Νότιας Αγγλίας, το Αιγαίο πέλαγος και περιοχές της μεσογείου θάλασσας ως και 0,6 m/s. Σχεδόν σε σταθερά επίπεδα φαίνεται να παραμένει το αιολικό δυναμικό των αιολικών περιοχών. Αν και οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου είναι μικρές, αυτές μπορεί να επιφέρουν μεγαλύτερες μεταβολές στην ισχύ των ανεμογεννητριών, η οποία είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του ανέμου. Επίσης πρέπει να επισημάνουμε ότι το παραπάνω γράφημα αποτυπώνει τη διαφορά των μέσων μηνιαίων ταχυτήτων του ανέμου. Για να εξάγουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα για την ισχύ που παράγουν οι ανεμογεννήτριες, θα πρέπει να εξετάσουμε τιμές ταχύτητας με μικρότερη χρονική κλίμακα (ανά δέκα λεπτά, ανά μία ώρα), έτσι ώστε να παρατηρήσουμε τη διακύμανση των τιμών γύρω από τη μέση τιμή και να αποδώσουμε με πιο μεγάλη ακρίβεια τη μεταβολή που υπόκειται το αιολικό δυναμικό.



Σχήμα 40::Διαφορά μέσωσων όρων ταχύτητας ανέμου

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η φορά του ανέμου με τη χρήση των πράσινων βελών (vectors) και παράλληλα αποτυπώνεται η μεταβολή στη διεύθυνση του ανέμου σε μοίρες από την αρχική τους διεύθυνση. Δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά που πρέπει να ληφθεί υπόψη όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα καθώς οι διευθύνσεις του ανέμου συμφωνούν με τις παροντικές. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες στρέφουν τα πτερύγια τους κάθετα στη φορά του ανέμου, έτσι ώστε να προσλαμβάνουν τη μέγιστη ισχύ του ανέμου. Μικρές αλλαγές στη διεύθυνση του ανέμου, δεν επηρεάζουν την ηλεκτρική παραγωγή των αιολικών πάρκων.



Σχήμα 41: Διαφορά μέσων όρων διεύθυνσης ανέμου

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τα υπό μελέτη αιολικά πάρκα

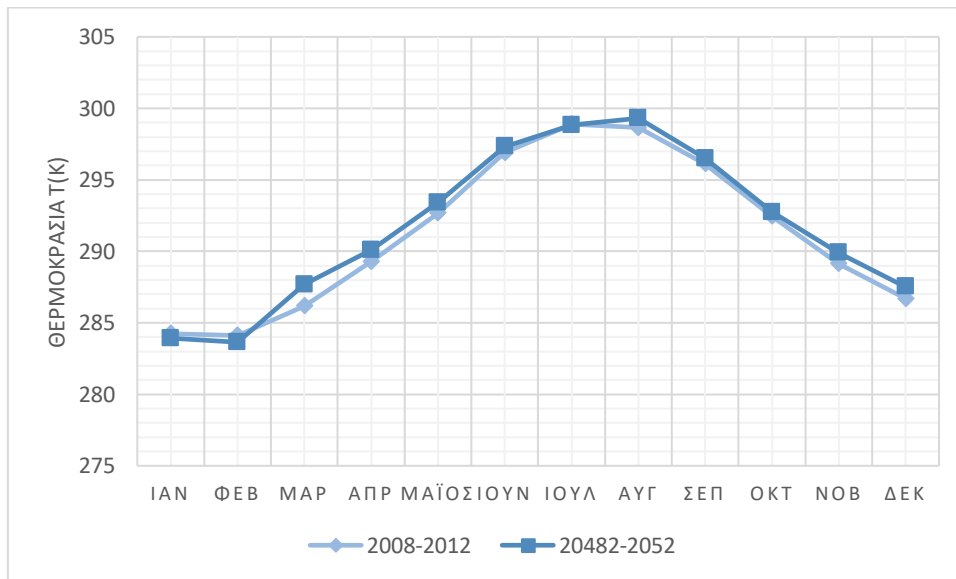
4.2.1 Μεταβολή θερμοκρασίας -επιφανειακής πίεσης

Η διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί διαφορές στην πίεση του αέρα μεταξύ των δύο σημείων. Αυτή η διαφορά πίεσης αέρα οδηγεί στον σχηματισμό ανέμων, καθώς η ατμόσφαιρα προσπαθεί να εξισώσει την πίεση του αέρα. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο ισχυρότεροι θα είναι οι άνεμοι που προκύπτουν. Αντίθετα, όταν μια μάζα αέρα ψύχεται γίνεται πιο πυκνή και πιο βαριά και τείνει να κατέβει (καθοδική κίνηση). Για να το πετύχει «σπρώχνει» τις άλλες τις πιο θερμές και πιο αραιές μάζες του αέρα και παίρνει τη θέση τους. Οι τιμές της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα, η οποία δίνεται από τη σχέση (10):

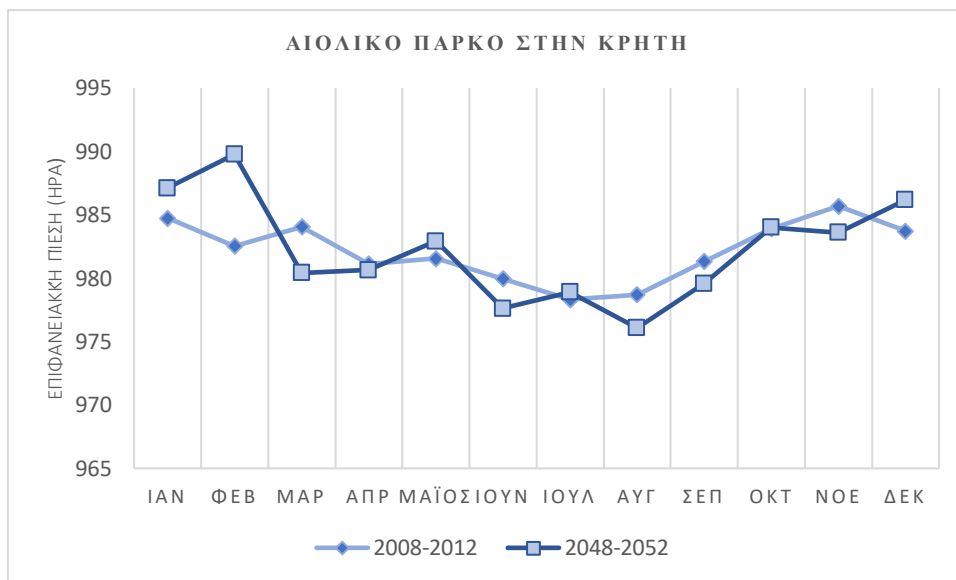
$$\rho = \frac{P}{RT} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Ο άνεμος μετακινείται στον αέρα και προκαλείται από διαφορές στην **πίεση του αέρα** μέσα στην ατμόσφαιρα. Ο αέρας υπό υψηλή πίεση κινείται προς περιοχές χαμηλής πίεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης, τόσο πιο γρήγορα ο αέρας ρέει.

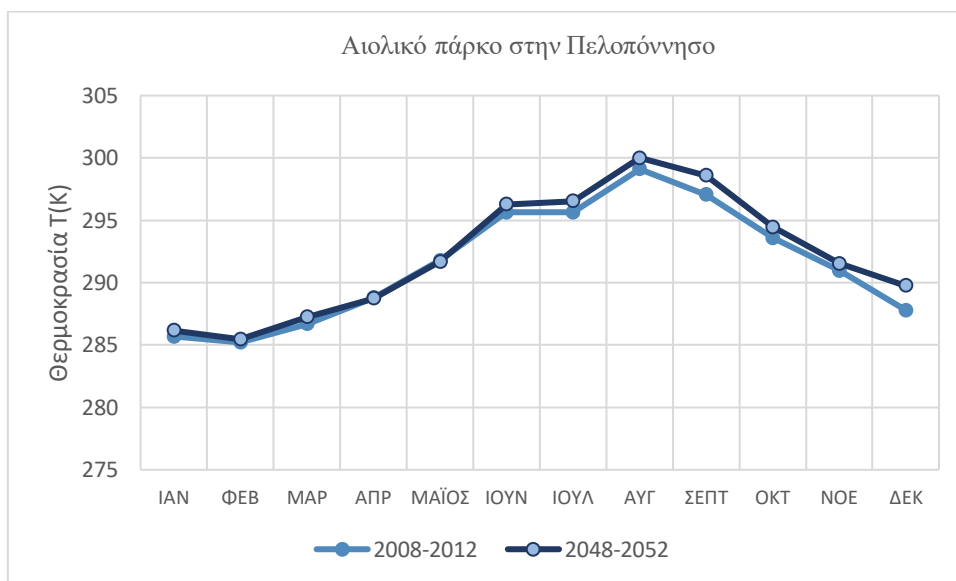
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και πίεσης για τα τρία αιολικά πάρκα που εξετάζονται. Συμπεραίνουμε ότι και στα τρία πάρκα η θερμοκρασία ακολουθεί την ίδια εποχιακή τάση και δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά, που θα αποφέρει αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου και κατ' επέκταση στην ισχύ που παράγουν οι ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 42: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο Κρήτης)



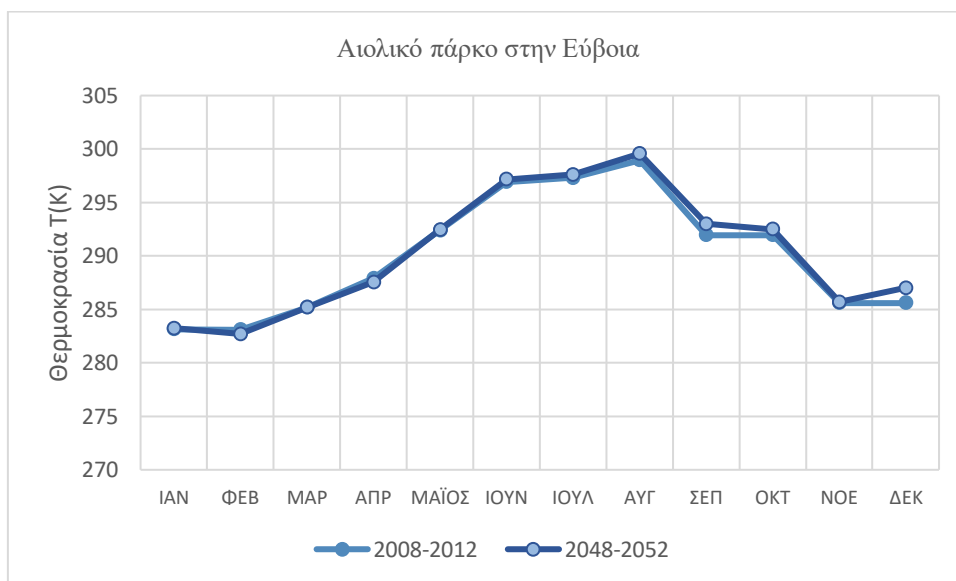
Σχήμα 43: Μέση μηνιαία επιφανειακή πίεση για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο Κρήτης)



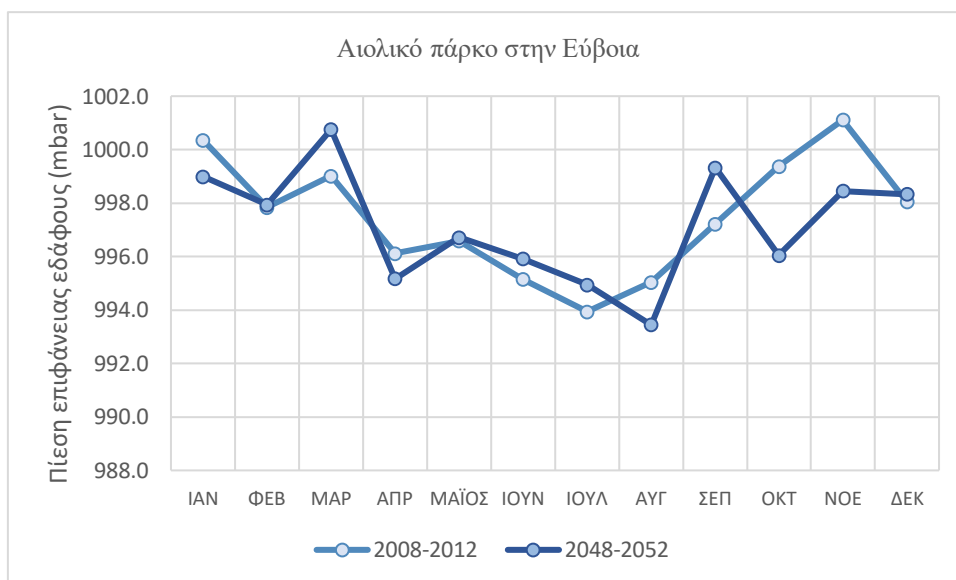
Σχήμα 44 :Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Αγ.Αθανάσιος”, Πελοπόννησος)



Σχήμα 45: Μέση μηνιαία επιφανειακή πίεση για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Αγ.Αθανάσιος”. Πελοπόννησος)



Σχήμα 46: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο Τσιλικόκας, Εύβοιας)



Σχήμα 47 : Μέση μηνιαία επιφανειακή πίεση για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο Τσιλικόκας, Εύβοιας)

4.2.2 Ταχύτητα ανέμου

Παρακάτω παρουσιάζεται τα γραφήματα που αποτυπώνουν τη μέση μηνιαία τιμή που καταγράφηκε στο ύψος των ανεμογεννητριών του κάθε αιολικού πάρκου, για τη χρονική περίοδο 2008-2012 και για την πενταετία 2048-2052. Οι τιμές του παρελθόντος προκύπτουν από πραγματικά δεδομένα, ενώ οι τιμές του μέλλοντος προκύπτουν από την προσομοίωση του WRF με τον τρόπο που περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο

Για το αιολικό πάρκο που είναι εγκατεστημένο στο νομό Ηρακλείου της Κρήτης, οι τιμές της ταχύτητας που προβλέπονται για το μέλλον φαίνεται να μην εμφανίζουν σημαντικές διαφορές με αυτές του παρελθόντος με μοναδική σημαντική αύξηση τον μήνα Ιούλιο όπου η ταχύτητα αυξάνεται κατά 1,1 m/s, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να επιφέρει αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής τον συγκεκριμένο μήνα. Μια μικρή αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται επίσης για τους τρεις πρώτους μήνες του χρόνου και για το μήνα Νοέμβριο. Τους υπόλοιπους μήνες του

χρόνου η ταχύτητα παραμένει στα ίδια σχεδόν επίπεδα με μοναδική σημαντική μείωση τον μήνα Μάϊος (-1 m/s) και το μήνα Δεκέμβριο (-0,6 m/s). Η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου προβλέπεται να αυξηθεί κατά 0,092 m/s.

Στο αιολικό πάρκο “Αγ. Αθανάσιος” του νομού Μεσσηνίας, προβλέπεται μια ελάχιστη αύξηση της ταχύτητας κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ τους υπόλοιπους μήνες η ταχύτητα παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της μέσης μηνιαίας ταχύτητας στο ύψος του δρομέα των ανεμογεννητριών που έχουν εγκατασταθεί στο συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, προβλέπει αύξηση το μέλλον κατά 0,13 m/s.

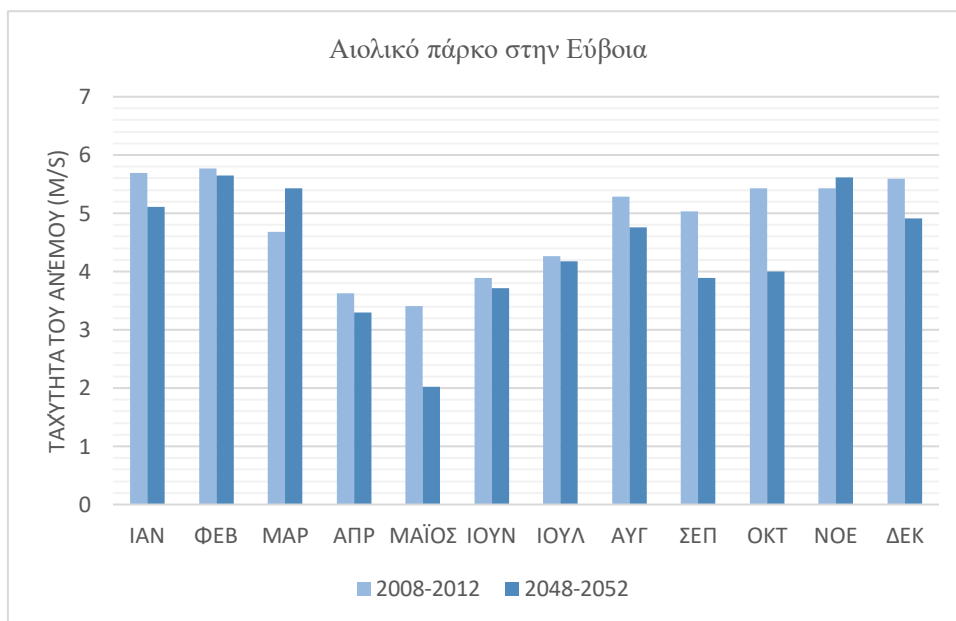
Για το αιολικό πάρκο που έχει εγκατασταθεί στην Εύβοια η μέση τιμή της πενταετίας 2008-2012, εκτιμήθηκε με βάση πραγματικά δεδομένα στα 4,84 m/s. Από το παρακάτω γράφημα φαίνεται ότι η ταχύτητα στο μέλλον εκτιμάται ότι θα μειωθεί σε μικρά ποσοστά, με πιο αισθητή τη μείωση της ταχύτητας τον μήνα Μάϊο, όπου η πτώση ανέρχεται στα 1,1 m/s. Η μέση τιμή ταχύτητας στο μέλλον εκτιμάται ότι θα είναι ίση με 4,38 m/s, γεγονός που αποδεικνύει πτώση της ταχύτητας του ανέμου κατά 0,46 m/s.



Σχήμα 48: Μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052), (αιολικό πάρκο Περδικοκορυφής, Κρήτη)



Σχήμα 49: Μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Αγ.Αθανάσιος”, Πελοπόννησος)



Σχήμα 50: Μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Τσιλικόκα” στην Εύβοια)

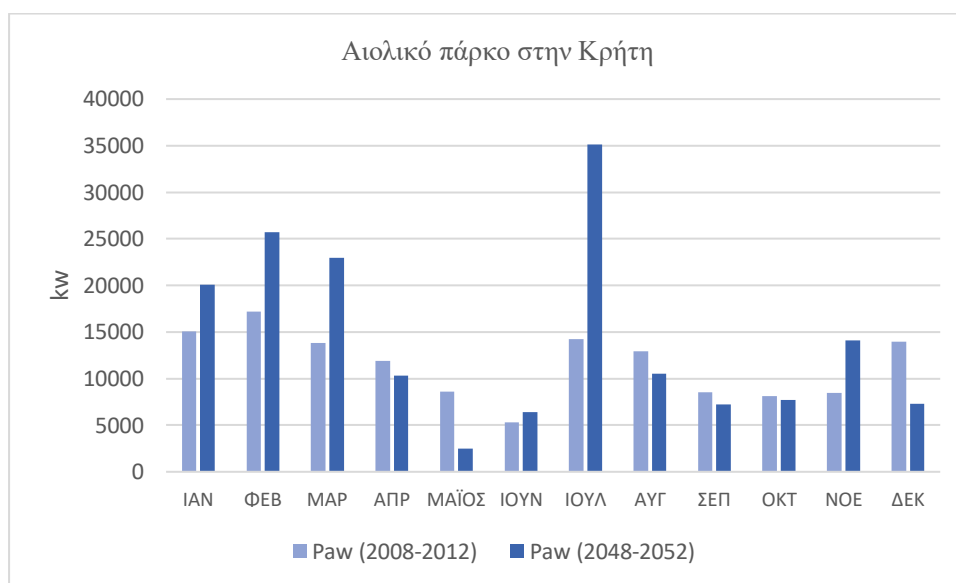
4.2.3 Μέση μηνιαία ισχύς ανεμογεννητριών

Έχοντας λάβει υπόψη τις μηνιαίες τιμές της ταχύτητας για τις δύο χρονικές περιόδους που εξετάζουμε, υπολογίσαμε την μηνιαία ισχύ που παράγουν οι δρομείς των ανεμογεννητριών. Λόγω του συντελεστή ισχύος του κάθε δρομέα ένα ποσοστό της ισχύος του ανέμου μετατρέπεται σε ωφέλιμη ισχύς. Ο υπολογισμός της μηνιαίας ισχύος που παράγει ο δρομέας της ανεμογεννητριας που εγκαθίσταται σε κάθε πάρκο, γίνεται με τη μέθοδο που περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο. Παρακάτω απεικονίζεται το σχήμα που περιγράφει τη μέση μηνιαία παραγόμενη ισχύς του αιολικού πάρκου που εγκαθίσταται στην Κρήτη. Παρατηρούμε ότι η τάση της ισχύος ακολουθεί την ίδια τάση με αυτή της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο επειδή η ισχύς όπως αναφέρθηκε πιο πάνω είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας η διαφορά

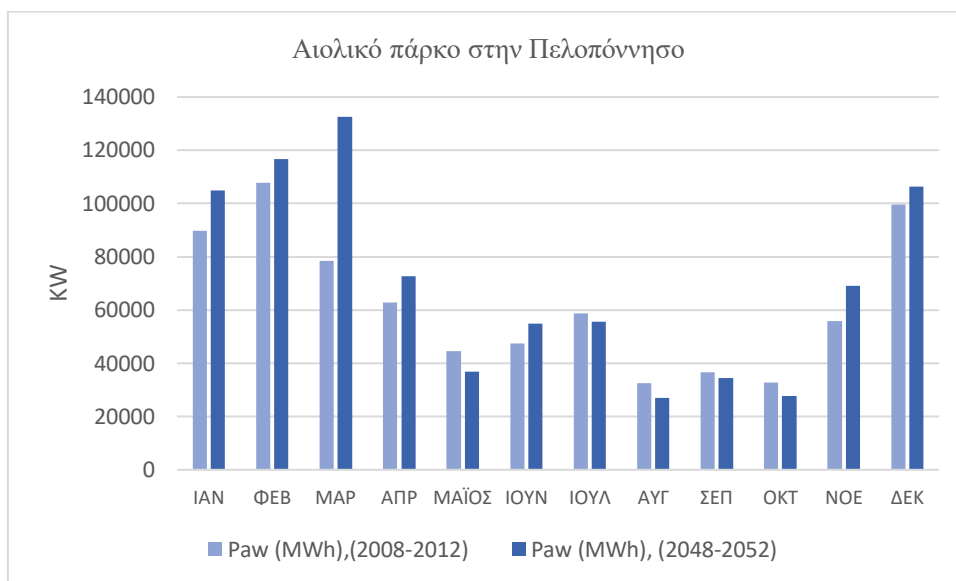
εμφανίζει μεγαλύτερη απόκλιση για σημαντικές μεταβολές της ταχύτητας. Για παράδειγμα η ισχύς των δρομέων των ανεμογεννητριών που παράγει το πάρκο τον μήνα Ιούλιο είναι σχεδόν τετραπλάσια από αυτή του παρελθόντος. Σε γενικές γραμμές η μέση ετήσια αιολική ενέργεια που προσλαμβάνουν οι τουρμπίνες των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου, προβλέπεται σύμφωνα με τις προσομοιώσεις να αυξηθεί στο μέλλον κατά 2645 KW.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η μηνιαία παραγωγή ισχύος των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου “Αγ. Αθανάσιος”, στην Πελοπόννησο. Για του περισσότερους μήνες παρατηρούμε μια μικρή άνοδο της ισχύος των δρομέων, με αυτήν του Μαρτίου να είναι πιο εμφανής. Η μέση τιμή του ετησίου ενεργειακού περιεχομένου του ανέμου για την πενταετία 2008-2012 εκτιμήθηκε στις 62.2 MW, ενώ αυτή για την πενταετία 2048-2052 εκτιμήθηκε στις 70 MW. Προβλέπεται λοιπόν μια άνοδο της ισχύος για το μέλλον, η οποία ισούται με 7,8 MW.

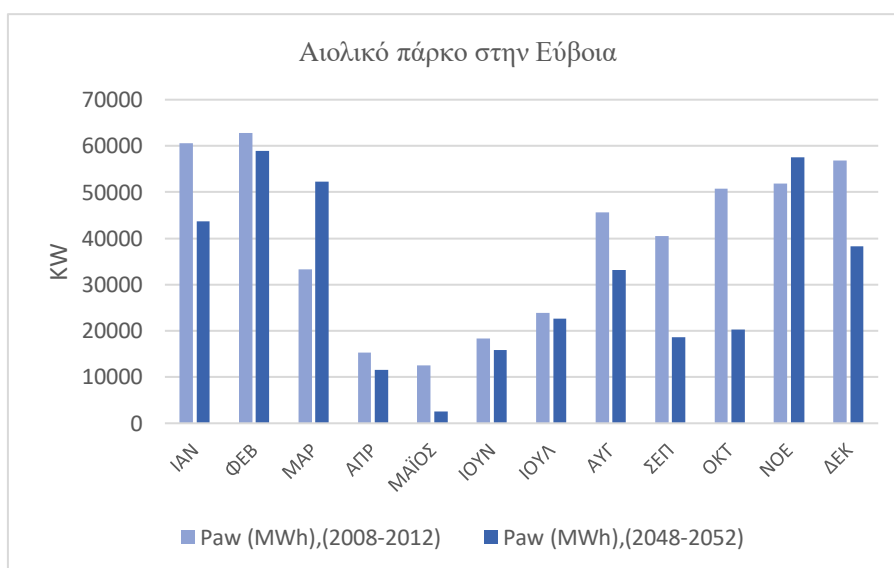
Στο αιολικό πάρκο της Εύβοιας παρατηρείται μια πτώση της ισχύος για τους δέκα από τους δώδεκα μήνες του χρόνου και αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από την πτώση της ταχύτητας του ανέμου, που φαίνεται στο διάγραμμα της ταχύτητας. Η μέση τιμή του ενεργειακού περιεχομένου που προσλαμβάνει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας και την μετατρέπει σε ωφέλιμη ισχύς εκτιμάται για το παρόν ίση με 39MW ενώ για το παρόν εκτιμάται 31 MW.



Σχήμα 51: Μέση μηνιαία ισχύς των δρομέων των ανεμογεννητριών στο αιολικού πάρκο “Περδικοκορυφή” στο νομό Ηρακλείου, στην Κρήτη για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052).



Σχήμα 52: Μέση μηνιαία ισχύς των δρομέων των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο “Αγ. Αθανάσιος” στο νομό Μεσσηνίας, στην Πελοπόννησο για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)



Σχήμα 53: Μέση μηνιαία ισχύς των δρομέων των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο “Τσιλικόκα” στην Εύβοια, για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)

4.2.4 Στατιστική ανάλυση ταχύτητας ανέμου

Αν θεωρήσουμε ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη μέση ταχύτητα του ανέμου τότε η μέθοδος που ακολουθείται στην προηγούμενη ενότητα είναι κατάλληλη. Ωστόσο είναι σημαντικό για τον πιο ακριβή υπολογισμό να λάβουμε υπόψη τη πιθανότητα εμφάνισης κάθε ταχύτητας στη διάρκεια του έτους και να γίνει μια στατιστική επεξεργασία της ταχύτητας του ανέμου. Δηλαδή να γίνει η καταγραφή των ανεμολογικών στοιχείων του κάθε αιολικού πάρκου και η εύρεση της κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου, η οποία μας δείχνει με μαθηματικό τρόπο την συχνότητα εμφάνισης των διαφόρων ταχυτήτων του ανέμου.

Για να προσδιορίσουμε την πιθανότητα εμφάνισης των ταχυτήτων του ανέμου που εμφανίζονται στα υπό μελέτη αιολικά πάρκα χρησιμοποιήθηκε η κατανομή **Weibull**, για την οποία γίνεται αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

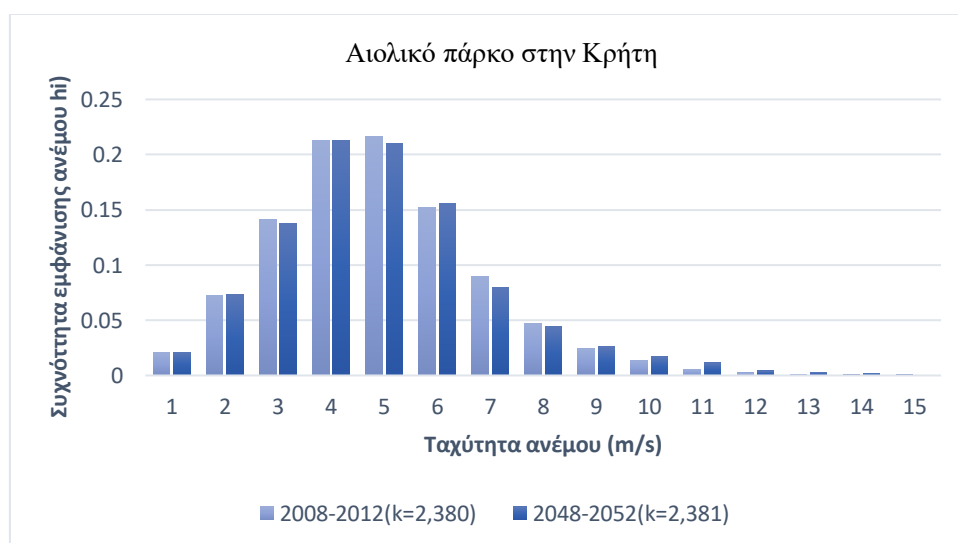
Για τον υπολογισμό της κατανομής αυτής χρησιμοποιήθηκαν τόσο για το παρόν όσο και για το μέλλον ωριαίες τιμές της ταχύτητας για κάθε χρόνο των δύο περιόδων που εξετάζονται. Παράλληλα υπολογίζεται ο συντελεστής κλίμακα c και ο συντελεστής k , της κατανομής Weibull, οποίοι είναι παράμετροι, χρήσιμοι για τον χαρακτηρισμό του αιολικού δυναμικού της υπό μελέτη περιοχής.

- **Κατανομή Weibull**

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή Weibull που αποτυπώνει την πιθανότητα εμφάνισης των ταχυτήτων του ανέμου. Για το αιολικό πάρκο “Περδικοκορυφή” στην Κρήτη οι ταχύτητες που είναι κοντά στη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης και το εύρος των τιμών γύρω από τη μέση τιμή παραμένει σχεδόν ίδια για τις δύο χρονικές περιόδους, με αποτέλεσμα ο συντελεστής σχήματος k να μεταβάλλεται αμελητέα. Αυτό σημαίνει ότι το αιολικό δυναμικό του αιολικού πάρκου δε θα εμφανίσει σημαντικές διαφορές στο μέλλον. Προβλέπεται για το μέλλον όπως φαίνεται στο διάγραμμα, μια μικρή αύξηση στην πιθανότητα εμφάνισης ταχυτήτων μεταξύ των ταχυτήτων 6m/s-15m/s, που σημαίνει ότι η ηλεκτρική παραγωγή θα σημειώσει μια μικρή άνοδο για το συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων.

Για το αιολικό πάρκο Αγ. Αθανάσιος στην Πελοπόννησο παρατηρούμε ότι η πιθανότητα εμφάνισης ταχυτήτων που προσεγγίζουν τη μέση τιμή αυξάνονται για το μέλλον. Ωστόσο μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης μεγάλων ταχυτήτων και αυξάνεται η πιθανότητα για μικρές ταχύτητες <4 m/s, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ώρες ακινητοποίησης των πτερυγίων λόγω ασθενών ταχυτήτων πρόκειται να αυξηθούν. Συνεπώς αναμένουμε για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο μια πτώση στην ηλεκτρική παραγωγή στο μέλλον. Η παράμετρος σχήματος προβλέπεται ότι θα αυξηθεί από 1,89 σε 2,16 που σημαίνει ότι οι τιμές της ταχύτητας που προσεγγίζουν τη μέση ταχύτητα του ανέμου, θα συγκεντρώνουν μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης διαμορφώνοντας ένα σταθερό αιολικό δυναμικό.

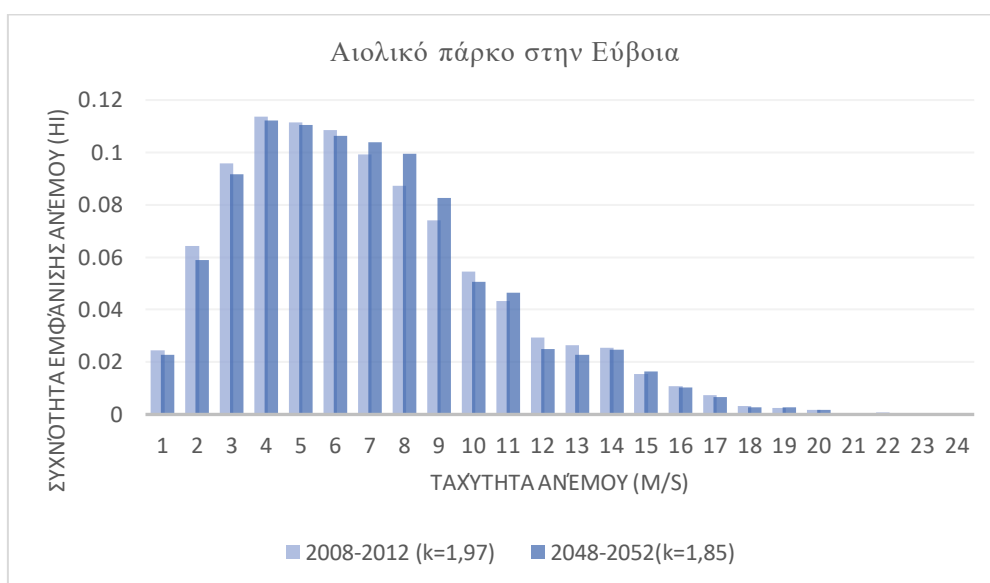
Η κατανομή Weibull για το αιολικό πάρκο της Εύβοιας φαίνεται να μην παρουσιάζει έντονες μεταβολές με την παράμετρο σχήματος k , να μεταβάλλεται από 1,97 σε 1,86. Παρατηρείται ωστόσο μια μικρή αύξηση στην πιθανότητα εμφάνισης ταχυτήτων μεγαλύτερες από τη μέση τιμή του ανέμου, γεγονός που σημαίνει ότι αναμένουμε μια μικρή άνοδο στην παραγωγή ενέργεια στο μέλλον.



Σχήμα 54: Κατανομή Weibull ταχυτήτων του ανέμου για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Περδικοκορυφή” της Κρήτης)



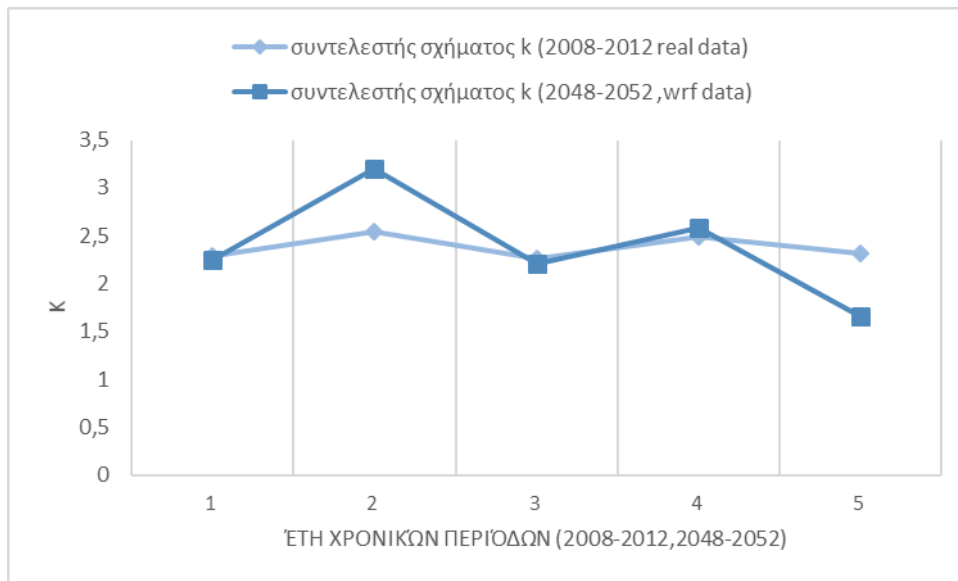
Σχήμα 55: Κατανομή Weibull ταχυτήτων του ανέμου για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Αγ.Αθανάσιος”, Πελοπόννησος)



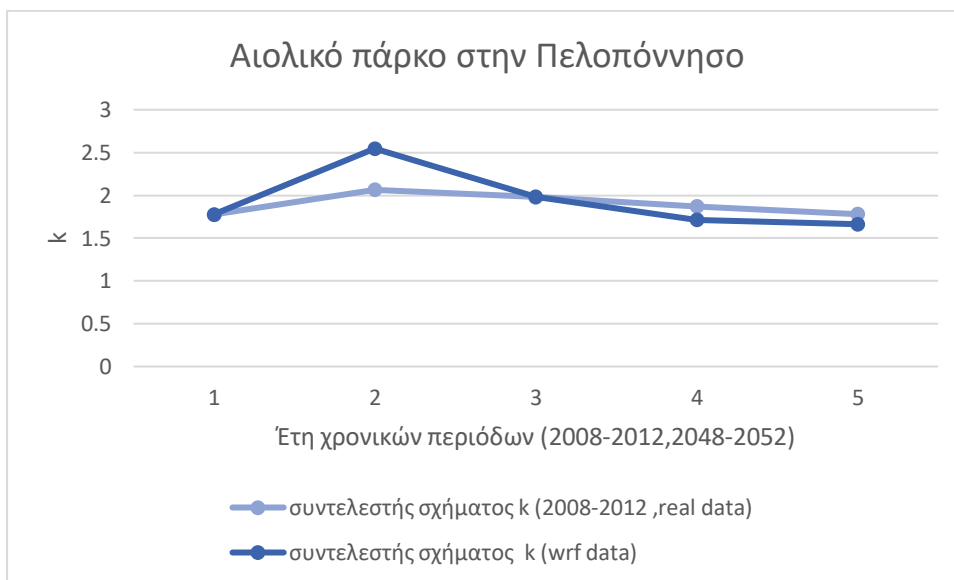
Σχήμα 56: Κατανομή Weibull ταχυτήτων του ανέμου για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Τσιλικόκα”, Εύβοια)

- **Παράμετρος σχήματος k**

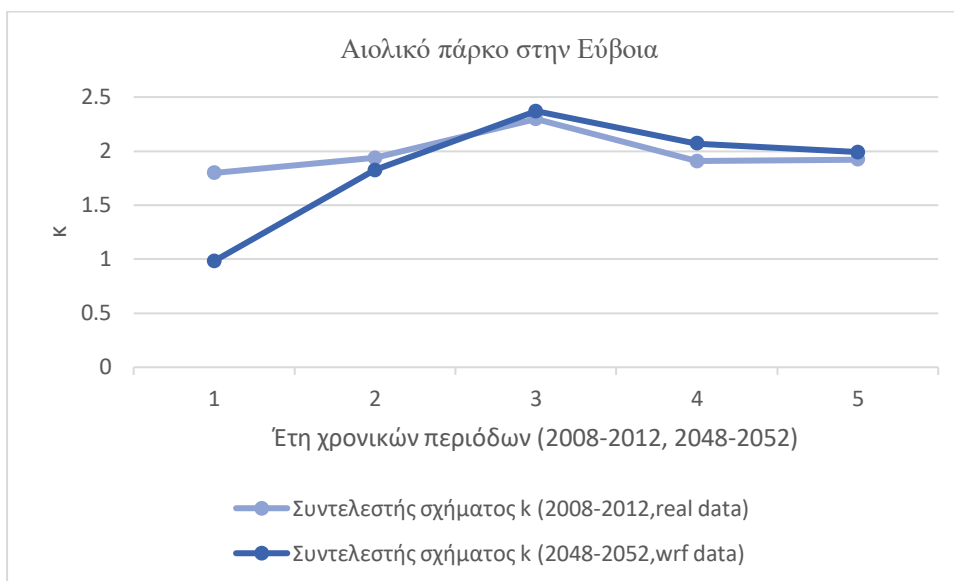
Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η παράμετρος σχήματος k, προκύπτει από τους υπολογισμούς της κατανομής Weibull και η τιμή του καθορίζει το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Κατά τη στατιστική ανάλυση του ανέμου για κάθε αιολικό πάρκο, υπολογίστηκε η παράμετρος για κάθε έτος των χρονικών περιόδων που μελετώνται. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα ετήσιας μεταβολής της παραμέτρου k για το παρόν και το μέλλον, για κάθε αιολικό πάρκο.



Σχήμα 57:Ετήσια μεταβολή της παραμέτρου k για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο “Περδικοκορυφή” στην Κρήτη)



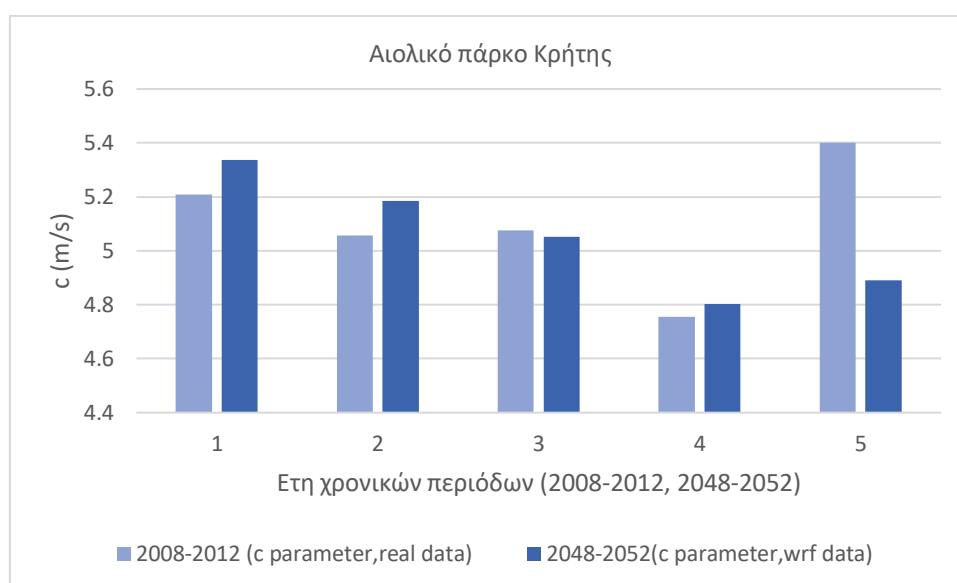
Σχήμα 58:Ετήσια μεταβολή της παραμέτρου k για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)(αιολικό πάρκο “Αγ.Αθανάσιος” στην Πελοπόννησο)



Σχήμα 59: Ετήσια μεταβολή της παραμέτρου k για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)(αιολικό πάρκο Τσιλικόκας, Εύβοια)

- **Παράμετρος κλίμακας c**

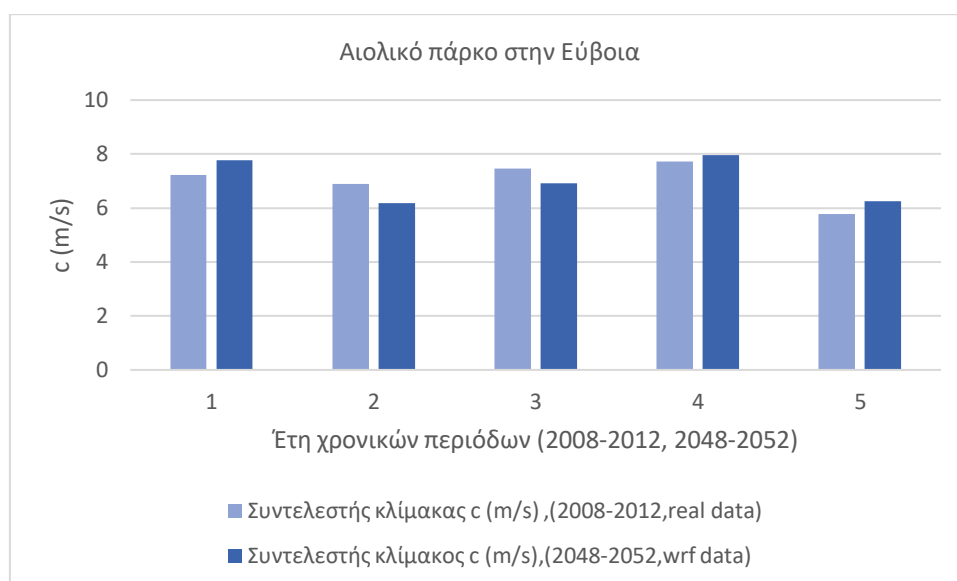
Η παράμετρος κλίμακας c σχετίζεται άμεσα με τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου και της παραμέτρου σχήματος k. Είναι ενδεικτική τιμή για την αποτύπωση του αιολικού δυναμικού και της έντασης των ανέμων στην περιοχή που εξετάζεται. Παρακάτω απεικονίζονται τα γραφήματα ετήσιας μεταβολής της παραμέτρου για το παρόν και το μέλλον σε κάθε αιολικό πάρκο.



Σχήμα 60: Ετήσια μεταβολή της παραμέτρου k για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)(αιολικό πάρκο Περδικοκορυφής, Κρήτη)



Σχήμα 61: Ετήσια μεταβολή της παραμέτρου κλίμακας c για την περίοδο βάσης (2008-2012) και την περίοδο αναφοράς (2048-2052) (Αιολικό πάρκο Αγ.Αθανάσιος, Πελοπόννησος)



Σχήμα 62: Ετήσια μεταβολή της παραμέτρου κλίμακας c για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (Αιολικό πάρκο Τσιλικόκα, Εύβοια)

4.2.5 Ηλεκτρική παραγωγή αιολικών πάρκων

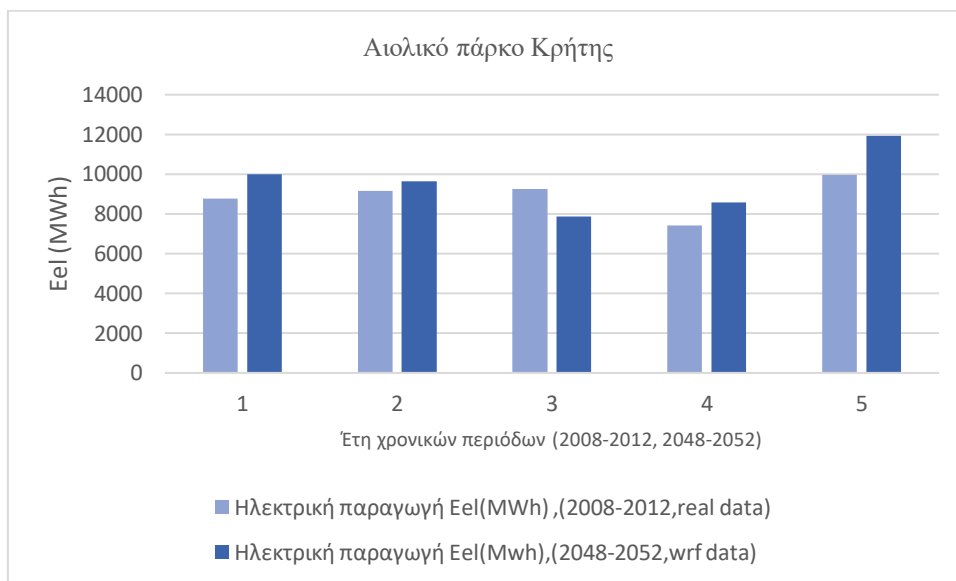
Έχοντας λάβει υπόψη όλα τα παραπάνω δεδομένα, επόμενο βήμα ήταν να υπολογιστεί η ετήσια παραγωγή ενέργειας για κάθε αιολικό πάρκο, με τη μέθοδο που περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο.

Στο αιολικό πάρκο της Περδικοκορυφής στην Κρήτη, είναι εγκατεστημένες 8 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V52/850. Η μελλοντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του πάρκου προβλέπεται να αυξηθεί κατά 3448 MWh, με τη μέση παραγωγή να εκτιμάται στις 48012 MWh για το μέλλον, ενώ για το παρόν εκτιμήθηκε στις 44564 MWh.

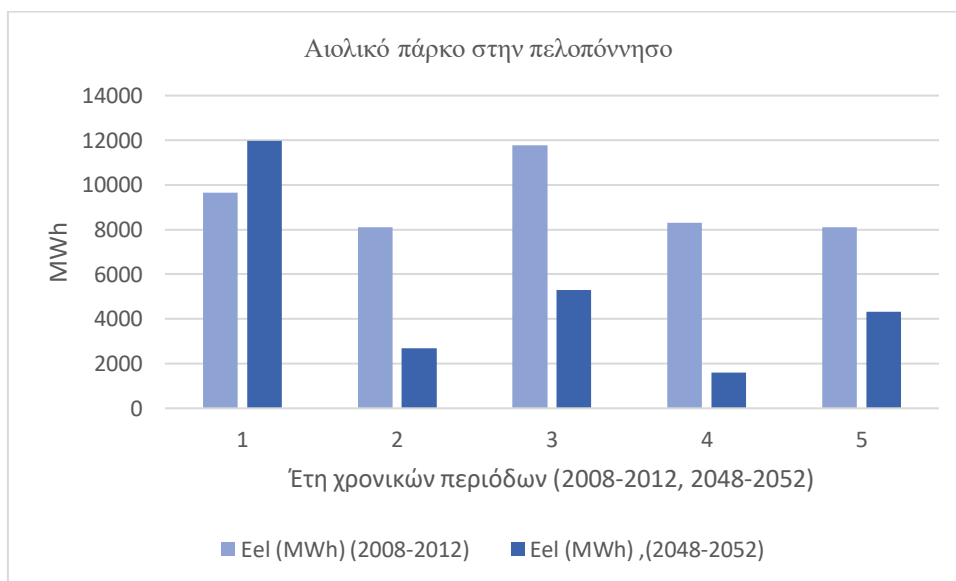
Στο αιολικό πάρκο του Αγ. Αθανασίου στην Πελοπόννησο, όπου είναι εγκατεστημένες 8 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V52/850, η ηλεκτρική παραγωγή για το παρόν εκτιμήθηκε με βάση πραγματικά δεδομένα στις 44592 MWh, ενώ για το μέλλον προβλέπεται μια σημαντική μείωση που ανέρχεται στις 25860 MWh.

Τέλος, στο αιολικό πάρκο της Τσιλικόκας στην Εύβοια, όπου έχουν εγκατασταθεί 17 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V44/600 η παραγωγή για το παρόν εκτιμάται στις 88876 MWh, ενώ για την πενταετία 2048-2052, η παραγωγή υπολογίστηκε στις 88837 MWh. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η παραγωγή του αιολικού πάρκου δε θα σημειώσει κάποια σημαντική διαφορά.

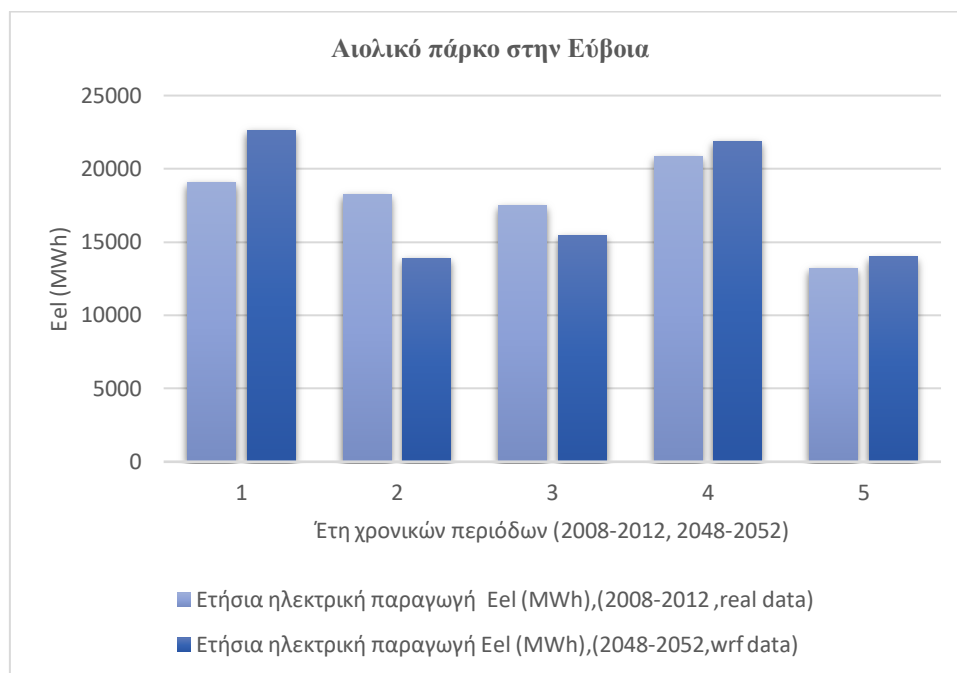
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα με την ετήσια μεταβολή της ηλεκτρικής παραγωγής των αιολικών πάρκων τόσο για το παρόν, όσο και για το μέλλον.



Σχήμα 63: Ετήσια μεταβολή της ηλεκτρικής παραγωγής για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)(αιολικό πάρκο της περδικοκορυφής, Κρήτη)



Σχήμα 64:Ετήσια μεταβολή της ηλεκτρικής παραγωγής για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052)(αιολικό πάρκο Αγ. Αθανάσιος, Πελοπόννησος)



Σχήμα 65: Ετήσια μεταβολή της ηλεκτρικής παραγωγής για την ιστορική περίοδο (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) (αιολικό πάρκο Τσιλικόκα, Εύβοια)

4.3 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Εφόσον έχουμε υπολογίσει τα ζητούμενα στοιχεία της παρούσας εργασίας, θα συνοψίσουμε σε αυτό το σημείο τις τιμές των υπό μελέτη μεταβλητών για τα τρία αιολικά πάρκα που επιλέξαμε να μελετήσουμε.

Για τις συγκεκριμένες τοποθεσίες που εντοπίζονται τα αιολικά πάρκα η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του ρότορα, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3: Ταχύτητα ανέμου, παράμετρος σχήματος k , παράμετρος κλίμακας c και ποσοστιαία διαφορά ταχύτητας ανέμου για κάθε αιολικό πάρκο.

Αιολικό πάρκο	Ταχύτητα ανέμου 2008-2012 (m/s)	Weibull shape factor k	Weibull scale factor C (m/s)	Ταχύτητα ανέμου 2048-2052 (m/s)	Weibull shape factor k	Weibull scale factor C (m/s)	% μεταβολή της ταχύτητας
Κρήτη	2,942	2,380	5,1	3,034	2,381	5,05	3,12
Πελοπόννησος	5,09	1,894	6,26	5,231	1,93	4,98	2,64
Εύβοια	4,842	1,97	7	4,382	1,84	7,02	-9,50

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο παρόν και στο μέλλον, για τα τρία αιολικά πάρκα.

Πίνακας 4: Ηλεκτρική παραγωγή στο παρόν και το μέλλον για τα τρία αιολικά πάρκα

Αιολικό πάρκο	Ηλεκτρική παραγωγή Eel 2008-2012 (MWh)	Ηλεκτρική παραγωγή Eel 2048-2052 (MWh)	Μεταβολή παραγωγής (MWh)
Κρήτη	44564, 25	48012, 73	3448, 479
Πελ/νησος	45952, 59	25859, 88	-20092, 71
Εύβοια	88876, 06	87837, 68	1038, 384

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση αιολικών πάρκων που είναι εγκατεστημένα σε διάφορες περιοχές του Ελλαδικού χώρου. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε κλιματική προσομοίωση με χρήση του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου NASA GISS ModelE. Η προσομοίωση κάλυπτε την περίοδο 1800-2055. Για το χρονικό διάστημα από την αρχή της προσομοίωσης και έως το 2008 χρησιμοποιήθηκαν παρατηρούμενες τιμές για τα αέρια του θερμοκηπίου, ενώ από το 2009 έως το 2055 υιοθετήθηκαν οι εκπομπές που προβλέπονται από το RCP8.5. Τα αποτελέσματα του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου για την ιστορική (2008-2012) και την μελλοντική περίοδο (2048-2052) υποβλήθηκαν σε δυναμική υποκλιμάκωση με χρήση του μέσης κλίμακας μετεωρολογικού WRF, προκειμένου να αυξηθεί η διακριτική τους ικανότητα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να υπολογιστούν οι μεταβολές στις μετεωρολογικές παραμέτρους ενδιαφέροντος μεταξύ ιστορικής και μελλοντικής περιόδου. Δεδομένου ότι οι τιμές αυτές αντικατοπτρίζουν την κλιματολογική μεταβολή που αναμένετε στην εξεταζόμενη περιοχή και όχι την πραγματική, ως τιμές αναφοράς για την ιστορική περίοδο (2008-2012) χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές μέσες τιμές από το CERA-SAT, ενώ για το μέλλον χρησιμοποιήθηκε το άθροισμα των ιστορικών τιμών του CERA-SAT και των μεταβολών που υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις του WRF για την ιστορική και την μελλοντική περίοδο. Οι μετεωρολογικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η επιφανειακή πίεση, η θερμοκρασία του ανέμου στα δύο μέτρα, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου στα 50 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους.

Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας έγινε μια στατιστική επεξεργασία του ανέμου για τις περιοχές όπου εγκαθίστανται τα αιολικά πάρκα που επιλέξαμε να εξετάσουμε με σκοπό τον υπολογισμό της ιστορικής και μελλοντικής ηλεκτρικής παραγωγής. Για τα δύο αιολικά πάρκα (Κρήτης, Εύβοιας) βρήκαμε μια αύξηση της παραγόμενης ενέργειας, ενώ για το αιολικό πάρκο στην Πελοπόννησο μια σημαντική μείωση στην ηλεκτρική απόδοση.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η παρούσα εργασία, στο δεύτερο σκέλος της, εστιάζει μόνο στη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, χωρίς να λάβει υπόψη τη μεταβολή στη διεύθυνση του. Είναι γνωστό ότι οι διατάξεις των ανεμογεννητριών στρέφουν τα πτερύγια τους κάθετα στη διεύθυνση της ροής, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή ενέργειας και να ελαττώσουν φαινόμενα ταλάντωσης των πτερυγίων που πρόκειται να προκαλέσουν φθορές. Δεδομένου λοιπόν του προαναφερθέντος γεγονότος και της μικρής μεταβολής της διεύθυνσης του ανέμου,

που προέκυψε από τις προσομοιώσεις του WRF, θεωρήσαμε στην παρούσα εργασία αμελητέα την επίδραση της διεύθυνσης του ανέμου στην ηλεκτρική απόδοση των αιολικών πάρκων.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε για τις μεταβλητές, διακρίνουμε μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας άνω του ενός βαθμού κελσίου κυρίως στη Δυτική Ευρώπη και στη Μεσόγειο Θάλασσα. Στις υπόλοιπες περιοχές η θερμοκρασία σημειώνει μια μικρή αύξηση η οποία μπορεί να επιφέρει αλλαγές σε γεωργικές περιοχές και στους τομείς της ενέργειας. Όσον αφορά την επιφανειακή πίεση και διεύθυνση του ανέμου, δεν παρατηρείται κάποια έντονη αλλαγή.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι η μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε και στα δύο σκέλη της διπλωματικής εργασίας. Στο πρώτο σκέλος φάνηκε ότι το αιολικό δυναμικό των παράκτιων περιοχών της Αγγλίας, της Μεσογείου και του Αιγαίου πελάγους, θα σημειώσει μια μικρή αύξηση που μπορεί ωστόσο να επιφέρει ακόμα μεγαλύτερες μεταβολές στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των αιολικών πάρκων που εγκαθίστανται στις συγκεκριμένες περιοχές.

Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας με τα κλιματικά δεδομένα που πήραμε από το WRF, παρατηρήσαμε στην Ελλάδα πτώση του αιολικού δυναμικού εμφανίζει ένα μέρος του Β. Αιγαίου και άνοδο η Πελοπόννησος και η Κρήτη. Για αυτό επιλέξαμε να εστιάσουμε τη μελέτη μας σε τρία αιολικά πάρκα που έχουν εγκατασταθεί σε αυτές τις περιοχές. Τα πάρκα που επιλέξαμε να μελετήσουμε είναι μικρής ηλεκτρικής παραγωγικότητας, γεγονός που σημαίνει ότι μεταβολές του αιολικού δυναμικού μπορεί να αυξήσει ή να ελαττώσει -αναλόγως τα αποτελέσματα -το επενδυτικό ενδιαφέρον που εμφανίζεται σε αυτές τις περιοχές. Αν και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου δε φάνηκε να εμφανίζει μεγάλες διαφορές στις υποκείμενες περιοχές, η διαφορά στην ηλεκτρική παραγωγή τους για τα δύο τουλάχιστον από τα τρία αιολικά πάρκα δε είναι αμελητέα. Συγκεκριμένα στο πάρκο του Αγ. Αθανασίου αν και η μέση ταχύτητα του ανέμου αυξήθηκε κατά 2,64% η ηλεκτρική παραγωγή του πάρκου, προβλέπεται να μειωθεί κατά 20000 MWh για την περίοδο 2048-2052. Αυτό σημαίνει ότι το εύρος των τιμών της ταχύτητας μεταβάλλεται και δείχνει να συγκεντρώνεται γύρω από τη μέση τιμή με την εμφάνιση μεγάλων τιμών της ταχύτητας να περιορίζεται.

Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η χωρική ανάλυση του κλιματικού μοντέλου WRF καλύπτει διαστάσεις 36 x 36 km και του CERA-SAT, από το οποίο πήραμε πραγματικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου για την περίοδο 2008-2012 καλύπτει χωρικές διαστάσεις 12,5 x 12,5 km. Αυτό σημαίνει ότι αν και μπορούμε να αποδώσουμε με σχετικά καλή ακρίβεια τις κλιματικές μεταβολές για τις συγκεκριμένες χωρικές διαστάσεις, είναι αναγκαίο προκειμένου να εξάγουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα για την ηλεκτρική παραγωγή των αιολικών πάρκων να αυξήσουμε τη χωρική ανάλυση. Αυτό θα μας βοηθήσει σημαντικά να καταγράψουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου που εμφανίζονται στα αιολικά πάρκα, λαμβάνοντας υπόψη την τοπογραφία των περιοχών και του αιολικού δυναμικού.

Επίσης στην παρούσα εργασία μελετήσαμε τρία αιολικά πάρκα μικρής αιολικής ισχύος που δεν βρίσκονται σε περιοχές της χώρας με τόσο υψηλό δυναμικό σε σχέσεις με άλλες περιοχές όπως αυτές του Αιγαίου πελάγους και των Κυκλάδων. Προτείνουμε λοιπόν με την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήσαμε, να μελετηθούν επιπλέον αιολικά πάρκα μεγαλύτερης ισχύος, που έχουν εγκατασταθεί σε περιοχές της χώρας με υψηλότερο αιολικό δυναμικό στις οποίες το επενδυτικό ενδιαφέρον είναι πιο έντονο. Σημαντικές μεταβολές της ηλεκτρικής ισχύος σε περιοχές που βρίσκονται κερδοφόρες αιολικές βιομηχανίες, θα έχουν σημαντική επίπτωση στα έσοδα των αιολικών επενδυτών.

Τέλος όπως αναφέρθηκε στην εργασία η παράμετρος σχήματος k και κλίμακας c της κατανομής Weibull, είναι αυτοί που καθορίζουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Θα μπορούσαμε λοιπόν χρησιμοποιώντας τις τιμές της ταχύτητας από το αριθμητικό μοντέλο WRF, να υπολογίσουμε

τις παραμέτρους αυτές τόσο για το παρόν όσο και για το μέλλον έτσι ώστε να εκτιμηθεί το
αιολικό δυναμικό της Ελλάδας.

Βιβλιογραφία.

- Ahrens C.D. (2011), *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*, Sixth Edition, Cengage Learning Publishing, pp. 528, ISBN-10: 0840049331
- Aleinov, I., and G.A. Schmidt 2006. Water isotopes in the GISS ModelE land surface scheme. *Global Planet. Change* 51, 108-120, doi:10.1016/j.gloplacha.2005.12.010.
- Benestad, R.E. (2004), Empirical-statistical downscaling in climate modeling, *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, 85 pp. 417-422, 10.1029/2004EO420002
- Bloom A, Kotroni V, Lagouvardos K (2008) Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8:1249–1257
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. & Whetton, P., *Climate Change 2007: Working Group 1: The Physical Science Basis* (Chapter 11), eds. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B., Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 847-940, 2007.
- Cradden, L.C., *Impact of climate change on wind energy generation in the UK*. Thesis (PhD), University of Edinburgh: Edinburgh, 2010.
- Duffield A.N., Sass J.H. (2003), “Energy – clean power from the Earth’s heat”, US Geological Survey, Virginia
- Harrison, G.P. and Wallace, A.R. 2005. Climate Sensitivity of Marine Energy. *Renewable Energy*. 30(12):1801-1817
- Hueging, H., Haas, R., Born, K., Jacob, D. & Pinto, J. G. (2013), Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections', *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52(4), 903-917.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jimmy F., Steve Y., Alexis L., Kot S. (2007), Wind Energy potential in Guangdong province”, presented at the 9th WRF users’ workshop, 23-27 June 2008
- Koch, D., G.A. Schmidt, and C.V. Field (2006), Sulfur, sea salt and radionuclide aerosols in GISS ModelE. *J. Geophys. Res.* 111, D06206, doi:10.1029/2004JD005550.
- Miller, R.L., R.V. Cakmur, J.P. Perlwitz, I.V. Geogdzhayev, P. Ginoux, K.E. Kohfeld, D. Koch, C. Prigent, R. Ruedy, G.A. Schmidt, and I. Tegen (2006), Mineral dust aerosols in the

NASA Goddard Institute for Space Sciences ModelE atmospheric general circulation model. *J. Geophys. Res.* 111, D06208, doi:10.1029/2005JD005796.

Najac, J., Lac, C. & Terray, L., (2011). Impact of climate change on surface winds in France using a statistical-dynamical downscaling method with mesoscale modelling. *International Journal of Climatology*, Volume 31, p. 415–430. Nolan, P., Lynch, P., McGrath, R., Semmler,

Pryor SC, Schoof JT, Barthelmie RJ (2006) Winds of change?: Projections of near-surface winds under climate change scenarios. *Geophys Res Lett* 33:L11702

Pryor, S. C. & Barthelmie, R. J, Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), pp. 430-437, 2010.

Redlinger R.Y, Andersen P.D, Morthorst P. (2002), *Wind Energy in 21st Century*, Palgrave publishers, New York

Sathyajith M. (2006), “Wind Energy- Fundamentals, Resource Analysis and Economics”, Springer publishers, New York

Schmidt, G.A., R. Ruedy, J.E. Hansen, I. Aleinov, N. Bell, M. Bauer, S. Bauer, B. Cairns, V. Canuto, Y. Cheng, A. Del Genio, G. Faluvegi, A.D. Friend, T.M. Hall, Y. Hu, M. Kelley, N.Y. Kiang, D. Koch, A.A. Lacis, J. Lerner, K.K. Lo, R.L. Miller, L. Nazarenko, V. Oinas, J.P. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, G.L. Russell, Mki. Sato, D.T. Shindell, P.H. Stone, S. Sun, N. Tausnev, D. Thresher, and M.-S. Yao (2006), Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data. *J. Climate* 19, 153-192.

Shindell, D.T., G. Faluvegi, N. Unger, E. Aguilar, G.A. Schmidt, D.M. Koch, S.E. Bauer, and R.L. Miller, (2006), Simulations of preindustrial, present-day, and 2100 conditions in the NASA GISS composition and climate model G-PUCCINI. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4427-4459, doi:10.5194/acp-6-4427-2006.

Tapiador, F.J., Navarro, A., Moreno, R., Sánchez, J.L., García-Ortega, E. (2020), Regional climate models: 30 years of dynamical downscaling, *Atmospheric Research*, 235, 104785, DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104785

Twidell J., Weir T. (2006), “Renewable Energy Resource”, Second Edition, Taylor and Francis publishers, New York

Wagner H., Mathur J (2009), “Introduction to Wind Energy Systems”, Springer publishers, New York

WGI, 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Βάσκου Ευμορφία (2015): “Η Ηλιακή Ακτινοβολία στην περιοχή της Ευρώπης (βάσει των κλιματικών μοντέλων που συμμετέχουν στο πρόγραμμα “CMIP5”)", Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2015

Βαφειάδης Κ.(2018), “Αιολική ενέργεια-Αιολικό δυναμικό”. Σημειώσεις για το μάθημα ‘Ανεμογεννήτριες, Υδροστρόβιλοι και Υδροηλεκτρικά Έργα” της κατεύθυνσης της ενέργειας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

- Δαγκαλίδης Α. (2010), Κλαδική Μελέτη 13, “Αιολικά Πάρκα “, Τράπεζα Πειραιώς, Μονάδα οικονομικής ανάλυσης και αγορών, Ιούνιος 2011
- Καλδέλλης Ι.Κ. (2005), “Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας”, Έκδοση 2η, Εκδόσεις
- Καραγκούνης Α.(2017), “Υπολογισμός αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου WRF, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής.
- Μαρνέλλος Γ. (2015), “Αιολική ενέργεια”. Σημειώσεις για το μάθημα “Ειδικά κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας” της κατεύθυνσης της ενέργειας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.